
FELIX · QUI · POTUIT · RERUM · COGNOSCERE · CAUSAS
ARTHUR · ULDERIC · DESJARDINS

A, N° 380
ORDRE
1050.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. Georges SAGNAC,

Ancien élève de l'École Normale supérieure,
Agrégé des Sciences physiques,
Préparateur à la Faculté des Sciences de Paris.

1re THÈSE. — De l'optique des rayons de Röntgen et des rayons secondaires qui en dérivent.

2e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 21 décembre 1900, devant la Commission d'Examen

MM. LIPPMANN, *Président.*
BOUTY, DUCLAUX, *Examinateurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1900



THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. Georges SAGNAC,
Ancien élève de l'École Normale supérieure,
Agrégé des Sciences physiques,
Préparateur à la Faculté des Sciences de Paris.

1re THÈSE. — De l'optique des rayons de Röntgen et des rayons secondaires qui en dérivent.

2e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 21 décembre 1900, devant la Commission d'Examen

MM. LIPPMANN, *Président.*
BOUTY, DUCLAUX, *Examinateurs.*

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1900

PREMIÈRE THÈSE.

DE

L'OPTIQUE DES RAYONS DE RÖNTGEN

ET DES

RAYONS SECONDAIRES QUI EN DÉRIVENT.

La première Partie de ce Travail, relative à la *Propagation des rayons X de Röntgen*, renferme les résultats de mes premières recherches au sujet des analogies et des différences que les rayons X présentent avec les rayons lumineux.

En présence de l'impossibilité de faire *diffracter* les rayons X à travers des fentes étroites, j'ai été conduit à étudier leur *dissémination* par la matière. Les propriétés des rayons disséminés ou *rayons secondaires*, souvent profondément différentes de celles des rayons de Röntgen dont ils dérivent, sont exposées dans la seconde Partie qui forme le corps principal de ce travail.

Ces recherches ont été faites au Laboratoire d'enseignement de la Physique à la Sorbonne. Je tiens à exprimer ici ma plus vive reconnaissance à M. Bouty, directeur du Laboratoire. C'est à ses précieux encouragements et à ses conseils éclairés que je dois d'avoir persévéré dans ces recherches.

PREMIÈRE PARTIE.

PROPAGATION DES RAYONS X DE RÖNTGEN.

---

1. Propagation dans l'air. — 2. Propagation à travers les prismes. — 3. Absorption par les cristaux. — 4. Illusions diverses. — 5. Déplacements et déformations des silhouettes. — 6. Maximums et minimums apparents d'éclairement. — 7. Conclusions expérimentales. — 8. Considérations théoriques.

1. *Propagation dans l'air.* — Dans le Mémoire où il expose sa découverte (¹), Röntgen insiste sur la perfection de la propagation rectiligne des nouveaux rayons sans interférence ni réfraction notable.

L'absence de franges d'interférence ou de diffraction ne fournit pas de renseignement sûr relativement aux longueurs d'onde possibles d'un faisceau de rayons *hétérogène*. Si, en effet, le récepteur est impressionné par des radiations dont les longueurs d'onde diverses forment une gamme assez étendue, les oscillations d'intensité que donnerait chaque rayon simple peuvent disparaître par suite de l'action simultanée des différentes radiations. Ainsi les franges d'interférence colorées que l'œil perçoit en lumière blanche cesseraient d'être visibles si la rétine ne se trouvait pas aveugle pour l'infra-rouge et l'ultra-violet, ni particulièrement plus sensible dans la région verte du spectre. Or, les faisceaux de rayons X utilisés jusqu'ici se comportent comme hétérogènes; ils deviennent, en effet, plus pénétrants après avoir traversé une lame d'aluminium (²) ou de toute autre matière. D'autre part,

---

(¹) Röntgen, premier Mémoire, *Sitzungsberichte der Würtzburger physik. medec. Gesell.*, décembre 1895; *Wied. Ann. d. Physik*, t. LXIV, p. 1-11, 1898; *Journal de Physique*, 3ᵉ série, t. V, p. 101.

(²) Benoist et Hurmuzescu, *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 235; 17 février 1896. Le fait a été retrouvé plus tard par Roïti et par Röntgen.

les préparations photographiques utilisées pour les enregistrer sont sensibles à des rayons de Röntgen de pouvoirs de pénétration très différents.

Mais, quelles que soient la complication et l'étendue d'un spectre, l'*épanouissement par diffraction* d'un faisceau de rayons au delà d'une petite ouverture d'un écran opaque est toujours lié par les lois géométriques de la diffraction aux longueurs d'onde des rayons. J'ai été ainsi conduit à étudier la propagation des rayons de Röntgen à travers une fente étroite et, pour avoir plus d'intensité, à travers un système de plusieurs fentes parallèles fournies par un réseau de fils de platine.

A l'époque de mes expériences [1], les générateurs de rayons de Röntgen seuls employés étaient des tubes à vide de Crookes dans lesquels les rayons cathodiques, issus d'une cathode plane ou concave, viennent frapper directement la paroi de verre du tube. De la région du verre ainsi frappée partent les rayons X de Röntgen. Dans le tube de ce type que j'ai employé, le fil servant d'anode, placé verticalement en travers du faisceau horizontal des rayons cathodiques, exerce sur eux une attraction électrique grâce à laquelle les rayons cathodiques convergent assez bien sur la paroi de verre dans une région allongée de 4^{mm} environ de largeur. Cette zone, sorte d'image du fil anodique, émet à elle seule une grande partie des rayons X de Röntgen issus du tube. La source allongée de rayons X ainsi obtenue est disposée contre une première fente métallique verticale F, large de 1^{mm}, qui en respecte la partie la plus active.

Au delà de la fente F, les rayons se propagent dans l'air sur une longueur de 75^{mm}, traversent une seconde fente métallique verticale f, large de $0^{mm},4$, puis, à 25^{mm} au delà, un réseau de fils de platine verticaux, enfin,

---

(1) G. Sagnac, *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 784; 30 mars 1896.

à 325^{mm} au delà du réseau, impressionnent une plaque photographique au gélatinobromure d'argent enfermée dans un châssis de bois. La moitié inférieure du faisceau défini par les fentes F et *f* passe au-dessous du réseau. Sur la plaque photographique, l'image inférieure du faisceau et l'image supérieure seront comparées pour reconnaître l'influence du réseau. Les fils de platine du réseau ont près de $0^{mm},05$ de largeur et l'intervalle fondamental du réseau a cette valeur. Le plan des fils du réseau est incliné à environ 45° sur le pinceau des rayons incidents, ce qui augmente l'action diffringente du système en réduisant à $0^{mm},02$ les largeurs des fentes comptées en projection sur le plan normal à l'axe du pinceau de rayons.

Une étude préalable de cet appareil, dans lequel la source de rayons de Röntgen est remplacée par une source lumineuse et la plaque sensible par un verre dépoli, a permis de régler le parallélisme des bords des deux fentes et des fils du réseau. L'image supérieure, dessinée sur le verre dépoli par le faisceau lumineux qui a traversé le réseau, est composée de l'image de la fente F donnée par la fente *f* et des images paragéniques qu'y ajoute à droite et à gauche le réseau diffringent. Grâce à la grande largeur de la fente F, ces diverses images se renforcent mutuellement et se recouvrent en grande partie pour fournir une image unique d'aspect cannelé.

L'*épanouissement de diffraction* se définit par l'excès de la largeur de cette image supérieure cannelée sur celle de l'image inférieure due aux rayons qui n'ont pas traversé le réseau. La photographie obtenue en éclairant la fente F par la lumière du sodium et en remplaçant le verre dépoli par une plaque Lumière sensible au jaune, a montré un épanouissement d'au moins 7^{mm}, en négligeant même les bords de l'image supérieure qui sont formés par des images paragéniques d'ordre supérieur assez peu intenses.

En remplaçant le brûleur à sel marin par la source

allongée de rayons de Röntgen dont j'ai parlé, j'ai obtenu sur une plaque sensible ordinaire une radiographie pour laquelle l'épanouissement, s'il existe, n'est certainement pas supérieur à $\frac{1}{4}$ de millimètre ([1]). Or, la longueur d'onde de la raie D correspond à l'épanouissement de 7^{mm} au moins, soit 28 fois environ $\frac{1}{4}$ de millimètre. On peut donc dire que les longueurs d'onde principales que peuvent avoir les rayons de Röntgen enregistrés par la plaque sensible ne dépassent pas la vingt-huitième partie de λ_D et, en toute certitude, qu'elles sont notablement inférieures à $\frac{1}{14}\lambda_D$, soit à $0^{\mu},04$. Elles sont ainsi considérablement inférieures aux longueurs d'onde de tous les rayons lumineux connus, puisque la longueur d'onde $0^{\mu},1$ est la limite extrême que l'on ait pu atteindre jusqu'ici dans le spectre ultra-violet [Schumann ([2])].

Quelques mois après que j'eus ainsi établi le premier en toute sûreté une limite supérieure des longueurs d'onde possibles des rayons de Röntgen, on construisit des tubes à vide fournissant des *sources* de rayons de Röntgen *à la fois beaucoup plus puissantes et beaucoup plus petites* que celles dont j'avais pu disposer. Dans ces tubes,

---

([1]) Dans le cas des rayons de Röntgen, les fentes du réseau traversées par le pinceau de rayons fonctionnent indépendamment les unes des autres, chacune à la manière de l'ouverture d'une chambre noire de Porta, et donnent autant d'images de la fente. L'image supérieure diffère, en effet, de l'image inférieure en ceci : dans les pénombres qui la bordent, elle présente de petites cannelures noires qui correspondent bien aux images des bords de la fente F, données par les fentes du réseau.

Dans une expérience préliminaire, la plaque sensible était placée à 800^{mm} du réseau et à 825^{mm} de la fente *f*. La fente F était assez fine pour que la silhouette de la fente *f* fût, dans le cas des rayons lumineux, bordée d'une frange de diffraction sur chaque côté. Les images paragéniques latérales, séparées ici de l'image centrale et les unes des autres, présentaient les mêmes franges très nettes. Avec les rayons de Röntgen, ces franges de diffraction disparaissaient en même temps que les images paragéniques.

([2]) V. Schumann, *Von den brechbarsten Strahlen und ihrer photographischen Aufnahme* (*Eders Jahrb.*) : 1896.

dits *focus*, les rayons de Röntgen prennent naissance sur une lame de platine placée au point de concours (*foyer*) des rayons cathodiques émanés d'une cathode concave. Le verre du tube ne risque plus de fondre sous le choc des rayons cathodiques; il reçoit seulement les rayons cathodiques diffusés par la lame de platine, lesquels en provoquent la fluorescence, et il livre passage aux rayons de Röntgen. La lame de platine (*lame focus* ou *anticathode*) pouvant être échauffée et rougir sans danger, on peut augmenter beaucoup la puissance de l'excitation électrique du tube, et les repos prolongés du tube focus ne sont pas nécessaires, comme pour les tubes à *anticathode* de verre ; enfin, dans les mêmes conditions, le platine émet beaucoup plus de rayons de Röntgen que le verre.

C'est avec un tube focus que M. Gouy (1) a pu reculer jusqu'à $0^{\mu},005$ la limite supérieure des longueurs d'onde possibles des rayons de Röntgen. M. Gouy choisit encore, pour caractériser nettement la diffraction, l'*épanouissement* d'un faisceau de rayons transmis par une fente étroite. Il emploie une seule fente verticale étroite f (largeur $0^{mm},045$), placée à 2500^{mm} de la plaque sensible et à la même distance d'une source linéaire de rayons de Röntgen formée par une lame focus verticale l rayonnant presque par la tranche (2). Bien que les rayons de Röntgen transmis par la fente f ne fassent qu'un

---

(1) Gouy, *Comptes rendus*, t. CXXIII, p. 44; 6 juillet 1896.

(2) Le remplacement de la première fente F de mon expérience par une fente fine (largeur $0^{mm},03$) équivalant à la source linéaire de M. Gouy, le remplacement du réseau par une seule fente fine, enfin l'augmentation des distances que j'employais jusqu'à celles utilisées par M. Gouy auraient exigé une énorme multiplication du temps de pose qui, *déjà de quelques dizaines d'heures* dans mes expériences, aurait dû alors dépasser *un an*. Cela montre que *mon dispositif est particulièrement bien adapté à la recherche de la diffraction de radiations peu actives issues d'une source de diamètre apparent notable et dont on ne peut utiliser la réfraction.*

angle de 6° avec le plan de la lame l de platine, leur intensité est encore la moitié de l'intensité maximum obtenue en plaçant la lame l normale au faisceau lf. La *loi d'émission des rayons de Röntgen*, indiquée pour la première fois par M. Gouy [1], est en effet toute différente de la loi photométrique du cosinus : une lame focus bien plane rayonne nettement jusque dans son plan, et l'intensité du rayonnement, presque uniforme en tous sens, s'affaiblit seulement pour les directions d'émission très rasantes. Grâce à cette ingénieuse utilisation de la puissance du tube focus, M. Gouy a pu réduire la durée de pose à quatre heures, malgré les grandes distances employées.

Plus récemment, MM. Haga et Wind ont fait des recherches encore plus précises sur l'épanouissement par diffraction au moyen d'un dispositif anologue à celui de M. Gouy, en portant à 10^{m} la distance de la lame focus l à la fente diffringente f, ainsi que celle de la fente f à la plaque photographique. Le temps de pose s'est élevé à cent heures réparties sur dix jours. Ils ont trouvé que *les longueurs d'onde des rayons de Röntgen sont inférieures à quelques dixièmes* de $\mu\mu$, c'est-à-dire au moins 2000 fois plus petites que la longueur d'onde de la lumière verte [2].

Remarquons que les expériences précédentes ne donnent

---

[1] Gouy, *Comptes rendus*, t. CXXII p. 1197; 26 mai 1896. Cette loi de l'émission des rayons de Röntgen a été retrouvée un an plus tard par Röntgen (3ᵉ Mémoire, *Sitzungsberichte der Akad. der Wissenschaften zu Berlin*, mai 1897, et *Wied. Annalen d. Physik*, t. LXIV, p. 21).

[2] H. Haga et C.-H. Wind, *Diffraction of Röntgen Rays* (*Académie des Sciences d'Amsterdam*, p. 420-426; 25 mars 1899, et *Wied. Annalen d. Physik*, t. LXVIII, p. 884 ; *loc. cit.*, p. 896, et t. LXIX, p. 327; 1899). Ces physiciens se demandent s'ils n'ont pas réellement observé la diffraction des rayons de Röntgen qui, dans leurs expériences, auraient des longueurs d'onde de $0^{\mu\mu},01$ à $0^{\mu\mu},27$. Malheureusement l'épanouissement observé n'est visible qu'au microscope et l'interprétation des délicates particularités des clichés au moyen de la diffraction souffre des objections (*cf.* G. Sagnac, *Journal de Physique*, 3ᵉ série, t. VIII, p. 644; 1899).

aucun renseignement sur les longueurs d'onde que peuvent avoir les rayons de Röntgen les plus absorbables du faisceau issu de la lame focus, lesquels peuvent être arrêtés par le papier noir ou le châssis de bois entourant la plaque sensible, par l'air qu'ils ont traversé pour l'atteindre et par la paroi de verre du tube focus.

2. *Propagation à travers les prismes.* — L'ombre d'un mince fil de platine projetée sur une plaque sensible par les rayons de Röntgen n'est pas déplacée par l'interposition de prismes variés (en cire, aluminium, crown, ébonite, soufre, flint, fer, zinc). M. Gouy a fait les expériences les plus précises à ce sujet avec le dispositif de la lame focus rayonnant presque par la tranche. S'il y a une différence entre l'indice de réfraction et l'unité, elle ne dépasse certainement pas $\frac{1}{200\,000}$ pour les cinq premiers corps, par exemple [1]. On voit que la *silhouette* d'un fil donnée par les rayons de Röntgen, même à travers la matière, est observée grâce au faible diamètre apparent de la source et à l'*absence de diffraction*, avec la précision des meilleures mesures optiques. Les rayons de Röntgen fournissent une méthode excellente pour réaliser expérimentalement un faisceau de lignes droites.

3. *Absorption par les cristaux.* — La réflexion, comme la réfraction et la diffraction, fait défaut pour les rayons de Röntgen. Il ne reste guère, pour essayer de *polariser* ces rayons, qu'à chercher s'il existe pour eux des cristaux *dichroïques* comme la tourmaline l'est pour la lumière. L'absorption des rayons de Röntgen par les divers corps étant un fait très général, j'ai réalisé avec plusieurs sub-

(1) Gouy, *loc. cit.* t. CXXIII, p. 43. De son côté, M. Beaulard montrait, dans le cas d'un corps très léger, le potassium, que la différence entre l'indice de réfraction et l'unité ne peut atteindre $\frac{1}{10000}$ (*loc. cit.*, t. CXXII, p. 782, et t. CXXIII, p. 301; 30 mars et 3 août 1896; *l'Éclairage électrique*, t. VIII, p. 419). Plus tard, MM. Voller et Valter (*Wied. Annalen d. Physik*, t. LXI, p. 88; 1897) établissaient le même résultat pour le diamant à $\frac{2}{10000}$ près.

stances cristallisées (quartz, spath d'Islande, tourmaline brune ou grise, mica, ferrocyanure de potassium, épidote) l'expérience des tourmalines croisées; j'ai comparé sur une même plaque sensible enveloppée de papier noir les transparences de deux systèmes juxtaposés formés chacun de deux lames cristallines parallèles, superposées dans l'un des systèmes avec leurs sections principales croisées, dans l'autre avec leurs sections principales parallèles. [1]. J'ai fait varier les épaisseurs des lames cristallines de $\frac{1}{30}$ de millimètre à plusieurs millimètres. J'ai aussi opéré en remplaçant la plaque sensible par un écran luminescent au platinocyanure de baryum. En aucun cas je n'ai observé, entre les plages contiguës comparées, une différence d'impression de la plaque photographique ou de luminosité de l'écran qui dépendît du dichroïsme. Une petite différence d'intensité peut se produire accidentellement entre les deux plages par suite d'une différence de nature des lames cristallines comparées; mais on la distingue aisément d'un effet de dichroïsme en tournant d'un angle droit sur place soit les deux

(1) G. Sagnac, *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 785; 30 mars 1896. Je disais dans cette Note, en parlant des méthodes pour rechercher la transversalité des vibrations, que l'*émission* et la *diffusion* seraient peut-être à essayer. Plus tard, M. L. Graetz a cherché sans succès à constater la polarisation *par émission* : les rayons de Röntgen issus d'une lame cristalline remplaçant la lame de platine d'un tube *focus* étaient reçus sur deux lames de tourmaline juxtaposées, de sections principales rectangulaires (*Wied. Annalen d. Physik*, t. LXV, p. 453; mai 1898). — Il resterait à étudier la diffusion : on comparerait les intensités des rayons ayant subi sur tel ou tel corps deux diffusions successives à angle droit l'une de l'autre, d'abord dans un même plan, puis dans deux plans rectangulaires; l'intensité des rayons deux fois diffusés serait plus faible dans le second cas s'il y avait polarisation par diffusion, comme pour la lumière. La première diffusion fournirait, en effet, des vibrations polarisées dans le plan de diffusion; la seconde diffusion jouerait alors le rôle d'un analyseur qui respecte plus ou moins la vibration incidente suivant la direction de sa section principale qui serait ici le plan de diffusion.

lames cristallines supérieures, soit les deux lames inférieures, de manière que les plages des sections principales parallèles et des sections croisées s'échangent mutuellement. La petite différence d'intensité observée parfois entre les deux plages devrait changer de sens si elle était due au dichroïsme; or, elle ne s'intervertit point. Quand le réglage est bien fait, elle disparaît avec tous les cristaux étudiés, sauf certains échantillons de *tourmaline* qu'il est difficile d'avoir tout à fait identiques, même en coupant en deux une lame qui paraît homogène. Elle se distingue, dans ce cas, d'un effet de dichroïsme, en ce qu'elle est indépendante, comme on a vu, de l'orientation des lames cristallines ([1]).

J'ai aussi recherché pour les rayons de Röntgen le dichroïsme circulaire, c'est-à-dire l'inégalité d'absorption des composantes circulaires droite et gauche que M. A. Cotton a découverte pour la lumière dans des dissolutions colorées de tartrates doubles ([2]). Il ne pouvait être question d'employer ici la méthode qui a conduit M. A. Cotton à sa découverte, méthode très sensible qui utilise un spectre cannelé. J'ai simplement calqué l'expérience des tourmalines parallèles et croisées en couvrant une bilame *q* de quartz, perpendiculaire à l'axe, droit sur une moitié *d*, gauche sur l'autre *g* (une bilame de Soleil, par exemple),

---

([1]) On doit suspecter tout résultat positif obtenu sans que la précaution de l'interversion des plages ait été prise. Il semble bien en particulier que MM. B. Galitzine et A. de Karnojitzky (*Comptes rendus*, t. CXXII, p. 717) n'aient observé qu'une différence d'intensité accidentelle.

Mes résultats négatifs sont confirmés par ceux qu'ont obtenus avec la tourmaline : M. H. Becquerel (*Comptes rendus*, t. CXXII, p. 762, 30 mars 1896), M. J.-J. Thomson (*Nature*, du 27 février 1896) et par les résultats indiqués par M. Röntgen dans son troisième Mémoire (*Wied. Annalen d. Physik*, t. LXIV, p. 36). M. Röntgen y précise le fait suivant indiqué déjà dans son premier Mémoire: la transparence d'une lame cristalline est indépendante de son orientation cristallographique.

([2]) A. Cotton, *Thèse de Doctorat* (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 7e série, t. VIII, p. 347).

avec une autre lame de quartz Q également perpendiculaire à l'axe, et j'ai comparé, à l'aide d'une plaque photographique ou d'un écran au platinocyanure de baryum, les intensités des rayons de Röntgen transmis par le système Qd et par le système contigu Qg. Si, par exemple, le quartz Q est droit, le système Qd, formé de deux quartz de même signe, est susceptible de jouer pour des vibrations transversales circulaires le rôle que les tourmalines parallèles jouent pour les vibrations lumineuses rectilignes, tandis que le système Qg, formé de deux quartz superposés de signes contraires, est l'analogue des tourmalines croisées; s'il y a dichroïsme circulaire, le premier système doit être plus transparent que le second. Pour éviter toute erreur accidentelle, j'ai pris pour lame de quartz supérieure Q une seconde bilame dont je plaçais la ligne de collage AB en croix avec la ligne de collage *ab* de la bilame inférieure *q*, et je vérifiais avec soin l'égalité d'intensité des rayons transmis à travers les zones opposées A*a* et B*b* ou A*b* et B*a*; j'étais ainsi sûr que les quartz comparés étaient bien également transparents lorsqu'ils étaient du même signe. Une différence d'intensité entre deux zones adjacentes, telles que A*a* et B*b*, n'aurait pu, dans ces conditions, provenir que du dichroïsme circulaire pour les rayons de Röntgen. Cette différence m'a toujours paru nulle ([1]).

Une méthode *indirecte* pour rechercher la transversalité des rayons de Röntgen consiste à observer la lumière de fluorescence émise normalement par une lame cristalline

([1]) Cette méthode réussirait sans doute pour la lumière avec les tartrates doubles colorés de M. A. Cotton : avec un bon dispositif photométrique, on pourrait constater une légère différence d'intensité entre la lumière qui a traversé une épaisseur convenable e de tartrate, droit par exemple, et celle qui a traversé une épaisseur $\frac{e}{2}$ du même tartrate droit, plus une épaisseur $\frac{e}{2}$ du tartrate gauche correspondant. L'expérience sera frappante et tout à fait comparable à celle des tourmalines croisées le jour où l'on aura découvert un corps possédant à un degré suffisant le dichroïsme circulaire.

parallèle sous l'influence des rayons de Röntgen. Les composantes des vibrations incidentes parallèles aux deux sections principales de la lame cristalline pourraient être inégalement absorbées par le cristal, d'où une inégalité des composantes vibratoires pour la lumière émise, qui serait alors polarisée. J'ai observé la lumière émise normalement par diverses lames parallèles de platinocyanures et j'ai trouvé qu'elle est polarisée comme si le cristal était soumis à l'action de la lumière ultra-violette ou visible. Par exemple, le platinocyanure double de lithium et de potassium fournit dans un analyseur biréfringent deux images, dont l'une est bleuâtre et à son minimum d'intensité quand l'autre est rougeâtre et à son maximum; les intensités et les colorations des deux images s'échangent quand on tourne d'un angle droit la lame cristalline dans le plan de sa face ou bien l'analyseur. Le phénomène est bien dû au dichroïsme du cristal puisque la lumière émise normalement à la lame cristalline ne peut pas être polarisée par réfraction. Seulement, il peut *a priori* être dû non seulement au dichroïsme pour les rayons de Röntgen absorbés, mais aussi bien au dichroïsme pour les rayons lumineux émis. Justement le platinocyanure double de lithium et de potassium est un cristal coloré dichroïque pour la lumière qu'il émet par fluorescence; il polarise la lumière par émission comme il la polarise par absorption.

En comparant divers platinocyanures, j'ai trouvé que la polarisation de la lumière émise sous l'influence des rayons de Röntgen s'affaiblit ou disparaît en même temps que le dichroïsme optique du cristal. Elle ne m'a jamais paru dépendre d'un phénomène de dichroïsme pour les rayons de Röntgen [1].

---

(1) Depuis que j'ai fait ces dernières expériences, j'ai appris que M. Schmidt, dans un travail sur la fluorescence polarisée, avait déjà dit : « Sous l'influence des rayons de Röntgen, les cristaux de platinocyanure de baryum se comportent comme s'ils étaient éclairés par la lumière. » (*Wied. Annalen d. Physik*, t. LX, note de la p. 144; 1897.)

Ainsi l'absorption des rayons de Röntgen, à l'opposé de celle des rayons lumineux, se montre indépendante de la structure cristalline de la matière. Elle ne paraît pas d'ailleurs varier sensiblement quand on passe d'un corps compact au même corps pulvérisé, ou bien d'un composé au mélange correspondant, pris en couches de même densité superficielle. Il convient de rapprocher ces deux ordres de faits en disant que l'absorption des divers corps pour les rayons de Röntgen présente un caractère principalement *atomique*. Les corps doivent leur absorption pour les rayons de Röntgen aux éléments plus ou moins absorbants qu'ils renferment; les éléments les plus absorbants sont le plus souvent ceux qui ont un gros poids atomique ou une grande densité; les éléments les plus transparents sont le plus souvent ceux qui ont un faible poids atomique ou une faible densité; ainsi le plomb, le platine et leurs sels sont parmi les corps les plus opaques; l'aluminium, le magnésium, le carbone, l'azote, l'oxygène, l'hydrogène, — le mica, les verres à base de potasse et chaux, la paraffine, l'eau, sont parmi les plus transparents.

4. *Illusions diverses.* — De telles différences entre la propagation des rayons de Röntgen et celle des rayons lumineux pouvaient faire penser que les deux espèces de rayonnements sont de natures essentiellement distinctes.

Plusieurs observateurs crurent, en effet, avoir découvert des phénomènes établissant formellement la distinction. Je citerai, en particulier, la déviation et le dédoublement des rayons de Röntgen au voisinage de conducteurs métalliques (¹); la déviation magnétique des *rayons de Röntgen électrisés* (²), qui semblait rapprocher les rayons de Röntgen des rayons cathodiques ou des rayons de Lenard; enfin

---

(¹) En particulier : MAURITIUS, *Wied. Annalen d. Physik*, t. LIX, p. 346; 1896.

(²) LAFAY, *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 713 et 809; 1896. — DE METZ, *loc. cit.*, t. CXXIII, p. 17 et 426; 1896.

des cas de diffraction conduisant à attribuer aux rayons de Röntgen étudiés des longueurs d'onde parfois identiques à celles de rayons calorifiques ou lumineux déjà connus (¹), bien différents cependant des rayons de Röntgen, ce qui semblait apporter un argument en faveur de l'hypothèse des vibrations longitudinales proposée par Röntgen dans son premier Mémoire (²).

J'avais eu, antérieurement, l'occasion d'observer les phénomènes qui ont donné lieu à ces interprétations et reconnu qu'ils se produisent aussi bien pour la lumière; ils dépendent seulement de la propagation rectiligne des rayons et des propriétés des couches sensibles photographiques. Je classe ces phénomènes en deux groupes distincts : les uns sont relatifs aux déformations singulières des silhouettes; les autres sont relatifs aux maximums et minimums apparents d'éclairement (³).

5. *Déplacements et déformations des silhouettes.* — Des silhouettes voisines semblent souvent *s'attirer, se déformer* mutuellement à distance. Ces apparences variées, souvent inattendues, se présentent seulement dans le cas où la source rayonnante a un *diamètre apparent notable,* que ce soit d'ailleurs une source de lumière ou une source de rayons de Röntgen; elles peuvent être groupées autour du cas fondamental de la silhouette d'un objet disposé en totalité ou en partie dans la *pénombre* d'un objet *antérieur.*

Si, entre un corps opaque A (*fig.* 1) et une source

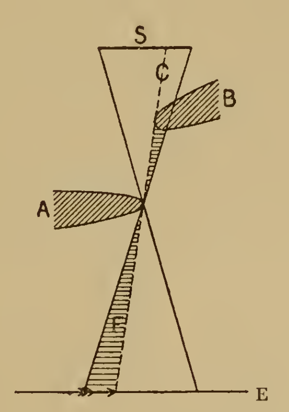
(¹) En particulier : KÜMMELL, *Abhandlungen der Naturf. Gesell. zu Halle*, t. XXI. *Voir* ci-après note 1 de la p. 27.

(²) RÖNTGEN, *Wied. Annalen d. Physik*, t. LXIV, p. 11; 1898.

(³) Depuis que j'ai communiqué ces expériences *sur les illusions qui accompagnent la formation des pénombres* (en même temps que des recherches analogues sur la vision) dans la séance de la Société française de Physique du 15 janvier 1897, et que j'en ai publié un bref résumé (dans le *Journal de Physique*, 3ᵉ série, t. VI, p. 169; 1897), mes remarques ont été reprises par M. Roïti (*Lincei* du 3 janvier 1897), et surtout par M. C.-H. Wind (*cf.* note 1 de la p. 26).

rayonnante S, on introduit progressivement un second corps opaque B, le faisceau C des rayons qui éclairent la pénombre du bord de A tourné vers B est supprimé dans une région F de plus en plus étendue. L'ombre pure de A s'étend dans la région F vers la silhouette de B, qui semble

Fig. 1.



ainsi l'*attirer*. Si l'éclairement de l'écran E est assez intense, les pénombres ne paraissent guère distinctes de la pleine lumière et le bord apparent de la silhouette de A est défini par un contour très voisin de la limite de l'ombre pure; la silhouette du corps A envahit alors une région F qui ne semblait pas lui appartenir avant l'introduction du corps B, et l'illusion d'une attraction devient très frappante.

On peut le constater en observant les silhouettes projetées par une source lumineuse étendue sur un écran diffusant ou par une source étendue de rayons de Röntgen sur un écran fluorescent au platinocyanure de baryum.

On peut aussi enregistrer ces silhouettes sur des plaques sensibles; pour les photographies et les *radiographies* ainsi obtenues, l'accroissement du temps de pose peut augmenter la netteté du phénomène. Dans le cas général, la partie déformée de la silhouette du corps A, ayant une pénombre rétrécie à la suite de l'introduction du corps B, prend un *contour plus net*, tandis que le contour de la silhouette de

A demeure relativement diffus pour les parties de A qui pénètrent moins profondément dans la pénombre de B ou qui sont extérieures à cette pénombre ; la déformation de la silhouette et son augmentation de netteté sont *localisées*.

D'après ces principes, il est facile d'expliquer les divers cas de déformations des silhouettes, dont voici quelques exemples pour le cas de deux écrans successifs seulement :

La silhouette d'une tige A, pénétrant dans la pénombre d'un écran B *obliquement* au bord de B, apparaît *incurvée* et *déviée* comme si les rayons qui projettent la silhouette étaient *déviés* en passant près de la tige A.

Si le corps B est un système de tiges parallèles, la tige A

Fig. 2.

A_1 A_2 A_3 A_4 A_5



A_1 A_2 A_3 A_4 A_5

apparaît en silhouette comme brisée en une série de fragments incurvés vers la normale aux tiges B, ou comme transformée en une sorte de torsade.

La *fig.* 2 reproduit la photographie obtenue en plaçant

devant une source circulaire un anneau opaque assez étroit pour ne donner qu'une pénombre sur une plaque sensible; entre l'anneau et la plaque sensible étaient disposées parallèlement cinq tiges opaques $A_1, A_2, \ldots, A_5$ assez étroites pour ne projeter que des pénombres. On voit que les tiges présentent des ombres pures en pénétrant dans la pénombre que projette l'anneau; elles paraissent s'y élargir et s'y incurver, sauf la tige centrale A_3; à l'intérieur de la silhouette de l'anneau, les silhouettes des tiges A_2, A_4 ne prolongent pas les silhouettes extérieures. La tige A_1 est comme *dédoublée* et la tige A_5 est comme *brisée* dans le milieu de la pénombre annulaire. Ces dernières singularités tiennent à ce que le diamètre apparent de la source, vue du milieu de la hauteur de la tige A_1, est divisé par l'anneau en deux parties projetant chacune une ombre particulière; le milieu de la silhouette de A_5 est projeté par la partie gauche de la source, tandis que le haut et le bas de la silhouette de A_5 sont projetés par la partie droite de la source et se trouvent, par suite, déplacés à gauche.

Avec un tube de Crookes où la source des rayons de Röntgen est une étendue notable de la paroi de verre exposée aux rayons cathodiques, les anomalies signalées apparaissent comme avec une source lumineuse de même position et de même diamètre apparent [1]. On peut faire disparaître à volonté le phénomène si l'on diaphragme suffisamment la source des rayons de Röntgen de manière à supprimer sensiblement les pénombres, ou bien si l'on emploie un *tube focus* où la source des rayons de Röntgen est d'étendue assez limitée [2].

Toutefois, le verre d'un tube focus émet lui-même

---

[1] Cela explique les anomalies signalées en particulier par M. Mauritius (*loc. cit.*).

[2] La source des rayons de Röntgen est particulièrement restreinte dans les tubes focus de petites dimensions de M. E. Colardeau.

des rayons de Röntgen sous l'influence des rayons cathodiques que la lame focus lui envoie par diffusion; un certain nombre d'apparences tiennent à cette association d'une étendue rayonnante notable à un centre d'émission relativement intense ([1]).

D'une manière générale, il faut tenir compte de la variation de l'éclat intrinsèque d'un point à l'autre de la source et de la forme des parties les plus actives de la source. Par exemple, la radiographie d'un petit corps peut avoir une *forme annulaire;* il suffit qu'elle soit faite au moyen d'un tube de Crookes dans lequel les rayons cathodiques forment un faisceau conique creux; la paroi de verre frappée par ce faisceau forme alors une source de rayons de Röntgen dont l'éclat est maximum suivant une *zone annulaire* ([2]).

Quand la source rayonnante est diaphragmée, il faut souvent tenir compte de l'*histoire* des rayons reçus par le diaphragme. Par exemple, si la source est déplacée devant une fente F *perpendiculairement* aux bords de F, la pénombre d'un fil *f* projetée par F apparaît diminuée du côté où l'éclairement de l'écran a augmenté, et le *milieu apparent* de la silhouette du fil *f* est déplacé du côté où l'éclairement a diminué, *comme si les rayons avaient subi une déviation.* Cette apparence se présente, en particulier, pour la silhouette d'un fil *f*, projetée par un tube de Crookes et une fente F; il suffit d'exciter un champ magnétique qui dévie le faisceau cathodique et, par suite,

---

([1]) G. Sagnac, *Journal de Phys.*, 3e série, t. VI, p. 169; 1897. *Voir* ci-après (note de la page 28 de ce travail) l'explication d'une expérience de M. Villari.

([2]) De même, les bords d'une flamme cylindrique creuse ont un éclat intrinsèque supérieur à celui du milieu de la flamme; aussi une tige parallèle aux bords de la flamme donne-t-elle sur un écran une silhouette plus sombre aux bords qu'au milieu; pour un éclairement suffisant, cette silhouette d'une tige apparait comme la silhouette de deux tiges parallèles.

la source de rayons de Röntgen pour avoir l'*apparence d'une déviation magnétique des rayons de Röntgen*.

Un faible déplacement de la source *parallèlement* aux bords de la fente F produit un effet analogue (1) si les bords de la fente F n'ont pas été réglés bien parallèles au fil f; ce dernier effet a précisément la même origine que l'effet de *réfraction apparente* des rayons de Röntgen qui a trompé un assez grand nombre d'observateurs et que MM. Hurion et Izarn (2) ont si bien signalé et expliqué.

On voit, d'après ce qui précède, quelles sont les précautions à prendre pour interpréter correctement les formes des silhouettes projetées par une source rayonnante de diamètre apparent sensible, quelle que soit d'ailleurs la nature du rayonnement. La comparaison avec les silhouettes projetées par une source lumineuse de même forme et de même position est particulièrement précieuse. Il faut toutefois se souvenir que la lumière peut se réfléchir, se réfracter (3), se diffracter; les rayons de Röntgen se propagent, au contraire, très exactement en ligne droite; ils subissent seulement de la part de tous les corps qu'ils rencontrent ou traversent une *dissémination* (4) sans aucune relation avec la réflexion ni la diffusion de la lumière sur les mêmes corps.

---

(1) Depuis que j'ai signalé (*Journal de Phys., loc. cit.*) les interprétations des expériences de M. Lafay, sir G. Stokes, a donné (*Comptes rendus*, t. CXXV, p. 216, 26 juillet 1897) une explication des expériences de M. de Metz, citées plus haut.

(2) HURION et IZARN, *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 1195; 1896. Le lecteur consultera fort utilement cette Note au sujet de l'explication du phénomène de *réfraction apparente* dans l'expérience faite au moyen de deux fentes verticales séparées à mi-hauteur par un écran horizontal.

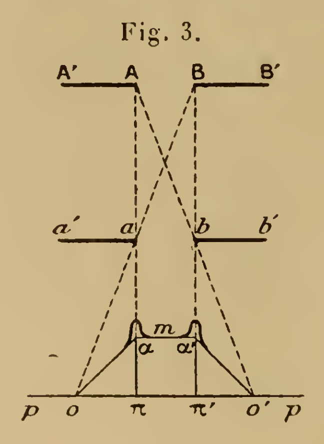
(3) De la réfraction de la lumière peut résulter le changement de l'*attraction apparente* en *répulsion apparente*, comme je l'ai montré dans mon travail sur les *Illusions de la vue qui accompagnent les défauts d'accommodation*. (*Société française de Physique*, séance du 15 janvier 1897. *Journal de Phys.*, 3e série, t. VI, p. 175.)

(4) *Voir* la seconde Partie de ce travail.

6. *Maximums et minimums apparents d'éclairement.* — Les ombres des bords d'une fente large, projetés par la *lumière* issue d'une fente suffisamment fine, présentent les franges de diffraction de Fresnel ([1]). Si la largeur de la fente éclairante augmente, l'influence de la diffraction disparaît graduellement; cependant la rétine d'un œil qui observe l'ombre sur un écran diffusant la lumière, ou bien une plaque photographique mise à la place de l'écran, enregistrent encore des maximums d'impression qui donnent l'illusion de franges de diffraction et ne correspondent pas à des maximums réels de l'éclairement.

Par exemple, si deux fentes AB et *ab* (*fig.* 3), de

Fig. 3.



largeur commune égale à $0^{cm},2$ sont à une distance peu supérieure à 10^{cm} ou 20^{cm}, une plaque photographique *pp*, placée à une distance du même ordre au delà de la seconde fente *ab*, enregistre une frange brillante α, α' près de chaque bord o, o' de la trace du pinceau lumineux défini par les deux fentes. On peut obtenir une épreuve sensiblement identique en plaçant contre la première fente AB, au lieu d'une source lumineuse, une source de *rayons de Röntgen*

([1]) Déjà la rétine de l'observateur, comme l'avait remarqué Fresnel (*Œuvres*, t. I, p. 348, 353, 354), et aussi les couches sensibles photographiques n'enregistrent pas exactement les positions des maximums ni des minimums réels d'éclairement, c'est-à-dire les milieux réels des franges.

de largeur suffisante, particulièrement un tube de Crookes émettant des rayons de Röntgen par sa paroi de verre. Dans les deux cas, les deux franges qui se dessinent sur la plaque sensible sont séparées par une distance égale à $0^{cm},2$, c'est-à-dire à la largeur même des deux fentes; elles sont donc précisément aux limites π et π' qui séparent la région de plein éclairement $\pi\pi'$ et les régions de pénombre πo et $\pi' o'$.

Les maximums ainsi observés ne sont pas dus à la diffraction : chaque bande infiniment étroite, découpée dans la fente AB parallèlement aux bords A, B, peut être considérée comme une source indépendante et projette chacun des bords a, b de la seconde fente avec des franges de diffraction; mais les franges de diffraction données par les diverses bandes ainsi découpées sur AB s'entremêlent dans toute l'étendue de la pénombre $o\pi$ du bord rectiligne a ou dans la pénombre $o'\pi'$ du bord a' (*fig.* 3) et y donnent une distribution d'éclairement sensiblement dépourvue de maximum ou de minimum [1]. L'éclairement aux divers points de la droite pp varie sensiblement suivant la ligne brisée $o\alpha\alpha' o'$ dont les points anguleux α et α' correspondent aux limites π et π' entre la pleine lumière et les pénombres. Il faut donc admettre que des maximums

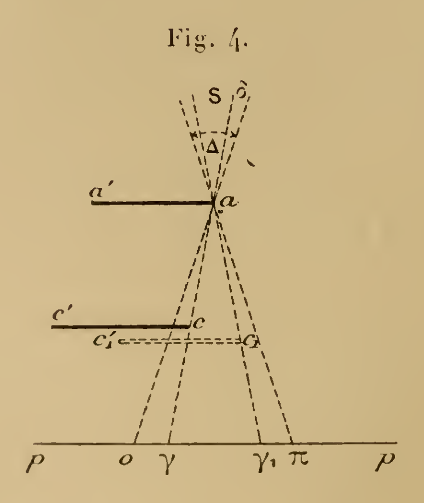
[1] Rigoureusement, l'éclairement moyen en π et π', défini par la superposition des franges de diffraction produites par les différents éléments de la fente AB, est supérieur à l'éclairement des régions voisines de la zone $\pi\pi'$ et il y a en π et π' un maximum d'éclairement. Mais le calcul montre que l'excès relatif d'intensité en π et π' est très faible dès que la largeur de la fente éclairante AB atteint plusieurs fois la largeur maximum qui permettrait encore de distinguer les diverses franges de Fresnel, ce qui est le cas de l'exemple cité.

Dans les mêmes conditions géométriques, l'excès relatif d'intensité serait encore beaucoup plus faible pour des radiations qui n'auraient que des longueurs d'onde 1000 fois plus petites que celle du vert moyen et, par suite, pour les rayons de Röntgen, et cependant les franges enregistrées par les plaques sensibles avec les rayons de Röntgen ne sont pas moins nettes qu'avec les rayons lumineux.

d'impression photographique ou rétinienne se produisent aux points π et π', bien qu'il n'y ait pas réellement de maximums appréciables d'éclairement en ces points. En disposant, à la place de la fente AB, un ruban de platine porté à l'incandescence par un courant électrique, je n'ai pu, en effet, déceler ni en π, ni en π', aucun maximum réel d'éclairement en promenant la fente étroite d'une pile thermo-électrique de part et d'autre de ces régions où l'œil voyait, sur une feuille de papier blanc, une frange brillante qu'une plaque photographique enregistrait aussi très bien.

Avec une source lumineuse, le passage du phénomène réel de diffraction au phénomène essentiellement rétinien ou photographique s'observe facilement en éclairant le bord d'un écran opaque avec une fente d'abord fine, qu'on élargit progressivement. On peut aussi observer la pénombre $o\pi$ (*fig.* 4) du bord a d'un écran $a'a$ projetée

Fig. 4.



par une source S de diamètre apparent Δ invariable. On introduit alors graduellement dans la pénombre $oa\pi$ le bord rectiligne c, parallèle à a, d'un second écran opaque cc'. Pour la position c voisine de la limite ao de l'ombre pure, le diamètre apparent de la source S est réduit à une valeur δ assez faible et l'ombre de c observée sur une

feuille de papier blanc pp, convenablement éloignée, est bordée d'une ou deux franges de diffraction de Fresnel (¹). Quand le bord c de l'écran mobile est enfoncé de plus en plus dans la pénombre $a\sigma\pi$ du bord fixe a, on voit s'effacer graduellement la frange grise de diffraction qui indiquait un minimum réel d'éclairement; en même temps apparaît de plus en plus nettement, en bordure de la frange grise de diffraction, du côté de l'ombre, une frange brillante qui subsiste bientôt seule, pour la position $c_1 c'_1$ de l'écran mobile, et se trouve alors à la limite γ_1 de la pleine lumière et de la pénombre du bord c_1; de même le bord fixe a projette une frange brillante analogue en π à la limite de sa pénombre; ce sont là des *maximums apparents* d'éclairement (²).

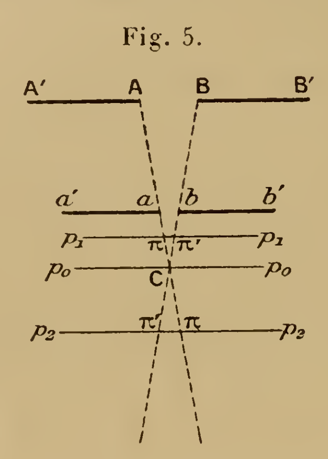
Si la source de lumière est remplacée par une source de rayons de Röntgen ayant même diamètre apparent, le phénomène enregistré par une couche sensible photographique pour la position $c_1 c'_1$ de l'écran est le même que pour la lumière. Mais pour la première position $c c'$, tandis que les rayons lumineux dessinent sur la couche sensible un phénomène réel de diffraction, les rayons de Röntgen continuent à dessiner un maximum apparent situé à la limite γ de la pénombre; c'est la seule différence nette que j'aie pu observer entre les rayons de Röntgen et les rayons lumineux en ce qui concerne les phénomènes actuels.

(¹) En toute rigueur, il faut tenir compte du fait que le diamètre apparent utile δ varie légèrement avec la position du point γ dans l'étendue même occupée par les franges de diffraction. C'est un problème de diffraction par deux écrans successifs.

(²) Cette expérience réussit bien au soleil, à condition que le bord a soit assez éloigné (à quelques mètres par exemple) de l'écran pp sur lequel il projette sa silhouette. Dans le cas du soleil, comme aussi d'une source qui n'a pas de bords rectilignes parallèles aux bords a, c des écrans employés, le point anguleux α du gradient de l'éclairement (*fig.* 3) ne peut exister même si l'on néglige l'influence de la diffraction. Mais il y a encore près de α une *rotation* rapide de la tangente à la ligne du gradient.

Le cas de la diffraction de la lumière étant laissé de côté, voici maintenant les divers résultats obtenus photographiquement avec un pinceau de rayons lumineux ou de rayons de Röntgen, défini par deux fentes AB et *ab*. Les maximums apparents α et α' (*fig.* 3), correspondant aux limites π et π' des pénombres des bords *a* et *b*, comprennent nécessairement une zone moins impressionnée *m*. Si la fente *ab* est plus étroite que AB (*fig.* 5), les deux maxi-

Fig. 5.

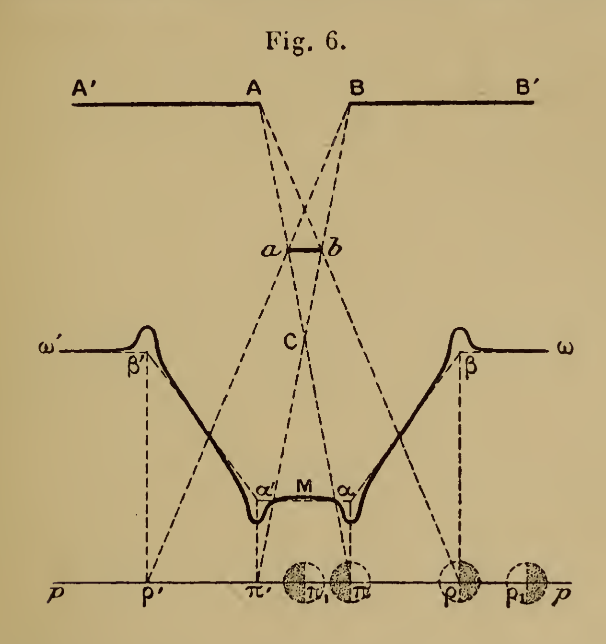


mums correspondant à π et π' se rapprochent quand le plan de la couche sensible est déplacé au-dessous de $p_1 p_1$; ces deux maximums se réunissent en un seul quand le plan de la couche sensible $p_0 p_0$ passe par la droite C, intersection des plans A*a* et B*b*; le minimum intermédiaire a graduellement disparu. Au delà de C, pour la position $p_2 p_2$ de la couche sensible, les deux maximums reparaissent séparés en π' et π, toujours aux bords des pénombres, mais *intervertis;* c'est-à-dire que le maximum π maintenant situé à droite correspond au maximum π situé à gauche dans le cas de $p_1 p_1$: c'est le maximum π toujours situé sur le plan A*a* qui subsiste seul quand on enlève l'écran *bb'*; au contraire c'est π', situé sur le plan B*b*, qui correspond dans les deux cas au bord *b* de l'écran *bb'*.

De même, la silhouette d'une tige *ab* (*fig.* 6), projetée

par les rayons issus d'une fente AB parallèle à ab, est bordée extérieurement de deux maximums en β et β'. Si la plaque sensible pp est placée au delà de la droite C, intersection des plans Aa et Bb, et, par suite, au delà de l'ombre

Fig. 6.



pure projetée par ab, le milieu de la silhouette de ab sur pp correspond à un éclairement sensiblement uniforme de π en π'; l'éclairement est continûment croissant de π en ρ et de π' en ρ', puis de nouveau sensiblement uniforme; le gradient réel de l'éclairement est très voisin de la ligne brisée $\omega' \beta' \alpha' \alpha \beta \omega$. Dans ces conditions, en même temps que des *maximums* d'impression en β et β', la plaque sensible présente des *minimums* d'impression en α et α', c'est-à-dire là où elle enregistrerait des maximums si la tige ab était remplacée par une fente de même largeur et de même position; la région M comprise entre α et α' présente naturellement un maximum relatif d'autant plus net que α et α' sont plus rapprochés; l'effet produit en $\alpha M \alpha'$ par une tige ab est ainsi complémentaire, en quelque sorte, de l'effet que produirait une fente ab.

Ces divers résultats sont compris dans l'énoncé suivant :

L'impression *radiographique, photographique* ou *rétinienne* est maximum ou minimum là où la ligne qui représente la variation réelle de l'éclairement présente un point anguleux, ou du moins une inclinaison rapide de sa tangente. C'est un maximum d'impression si la pointe de l'angle est dirigée vers le haut (par exemple, β et β′, *fig.* 6); c'est un minimum si la pointe de l'angle est dirigée vers le bas (1) (par exemple, α et α′, *fig.* 6). Cette loi a été vérifiée dans les différents cas en mesurant les distances qui

---

(1) Il resterait à approfondir les lois photométriques du phénomène, c'est-à-dire à rechercher l'influence de l'intensité de l'éclairement et de la forme de son gradient sur l'intensité des maximums et minimums apparents. Il est déjà évident, et l'expérience confirme que : la netteté d'un maximum ou d'un minimum diminue graduellement à mesure que l'angle du gradient de l'éclairement, correspondant à ce maximum ou à ce minimum, se rapproche de 180°, ou encore lorsque cet angle se trouve de plus en plus rapproché d'un angle dirigé en sens inverse, de façon que les deux effets inverses, maximum et minimum, empiétant l'un sur l'autre, tendent à s'effacer mutuellement.

Depuis que j'ai indiqué la loi de distribution des maximums et minimums de l'impression radiographique, photographique ou rétinienne (*Société française de Physique*, séance du 15 janvier 1897), M. Wind a repris cette question et a trouvé des résultats entièrement d'accord avec les miens (C.-H. Wind, *On maxima and minima of apparent brightness resulting from optical illusion*. Académie royale d'Amsterdam, 24 juin 1898). Ce Mémoire de M. Wind renferme de belles expériences sur l'illusion optique dans le cas de la vision et de la photographie réalisées au moyen de disques tournants ajourés suivant diverses lois. Dans un travail plus récent, M. C.-H. Wind insiste sur le fait qu'un maximum ou minimum apparent devient invisible à l'œil, si, au moyen d'une feuille de papier noir qui respecte la région même du maximum ou du minimum, on cache la région adjacente. Cela démontre bien que les phénomènes en question sont des apparences dues à l'influence des régions voisines (*Physikalische Zeitschrift*, n° 10, S. 112-113).

Il convient d'ajouter que M. C.-H. Wind ne connaissant mon travail que par le bref résumé de mon article du *Journal de Physique*, (3e série, t. VI, p. 173), a reconnu, à peu près indépendamment de moi, les lois du phénomène. Enfin M. C.-H. Wind a retrouvé un ancien travail de M. E. Mach qui signale les maximums d'éclairement à l'intérieur de la silhouette d'une fente éclairée par la lumière issue d'une fente parallèle (*Wiener Sitzungsberichte*, 2 Abt. 52, S. 303; 54, S. 131, 393; 57, S. 11; 1866-1868).

séparent les minimums et les maximums, par exemple $\pi\pi'$ et $\rho\rho'$ dans le cas de la *fig.* 6.

Il est indispensable de tenir compte de cette loi pour interpréter correctement les particularités des silhouettes projetées par les rayons de Röntgen ou les rayons lumineux, et pour ne pas attribuer à une propriété spéciale du faisceau de rayons étudié, par exemple à une *réfraction* ou à une *diffraction*, des phénomènes qui résultent du mécanisme de formation des silhouettes sur les couches sensibles photographiques ou sur la rétine. Par exemple, les systèmes de fentes ou de tiges à bords parallèles produisent des *apparences de franges de diffraction* dont les positions dépendent, comme il a été dit, de la distribution des pénombres et *ne suivent pas du tout les lois géométriques de la diffraction*. Il en résulte que si l'on assimilait ces franges apparentes à des franges de diffraction, les longueurs d'onde des rayons de Röntgen ou des rayons lumineux, déterminées d'après cette fausse interprétation, *varieraient* d'une expérience à l'autre avec les largeurs des fentes ou les distances des écrans. Cette circonstance aurait pu avertir plusieurs observateurs de l'erreur d'interprétation qu'ils ont ainsi commise [1].

Maintenant, si l'on cherche à quoi tient la production de ces maximums et minimums d'impression, on peut admettre que l'*impression en un point* d'une couche sensible photographique, ou de la rétine d'un œil, n'est pas uniquement définie par l'éclairement que les rayons de

---

[1] M. Kümmell a cru démontrer de cette manière que les rayons de Röntgen ont une longueur d'onde voisine de 3 microns et en a déduit qu'ils ne peuvent pas être des vibrations transversales de l'éther lumineux (*Abhand. d. Naturf. Gesell. in Halle,* t. XXI). MM. Calmette et G.-T. Thuillier ont cru trouver des longueurs d'onde du même ordre de grandeur (*Comptes rendus,* t. CXXXII, p. 877; 1896). Au contraire, M. L. Fomm trouve 0,014 micron (*Wied. Annalen d. Physik,* t. LIX, p. 350; 1896); M. J. Precht trouve 0,016, 0,36 et 0,83 micron (*loc. cit.,* t. LXI, p. 353-360; 1897); et plus récemment M. Maier

Röntgen ou les rayons de lumière incidents produisent réellement en ce point; *elle dépend* aussi *de la loi de variation de l'éclairement* dans le voisinage du point considéré; en d'autres termes, *il y a action à distance des points voisins sur le point considéré.* Cette hypothèse une fois admise, il est aisé de voir que l'action à distance d'un point sur un autre ne doit pas y renforcer l'action *directe* des rayons incidents; ce doit être une *action secondaire destructive.* En effet, en un point ρ de la couche sensible (soit photographique, soit rétinienne) où se produit un *maximum* apparent β (*fig.* 6), l'action secondaire émane des divers points de la couche sensible compris dans un petit cercle de centre ρ. L'action du demi-cercle de droite (pointillé sur la *fig.* 6) est la même pour le point ρ situé à la limite de la pénombre et pour le point ρ_1 situé dans la région de plein éclairement; la différence porte uniquement sur la moitié gauche du cercle, laquelle est *plus vivement éclairée pour* ρ_1 *que pour* ρ; puisque le résultat est une *impression plus faible en* ρ_1 *qu'en* ρ, il faut admettre que l'impression diminue quand l'action secondaire provient de points plus vivement excités; on est ainsi conduit à admettre que *l'action secondaire a un effet négatif* et tend à diminuer l'impression produite par l'action directe des rayons incidents. Il est facile de voir, de même, que *le minimum* α *d'impression* correspondant au point π (*fig.* 6) *est dû à une augmentation de l'action secondaire destructive;* le cercle π de la couche sensible

---

commet encore la même erreur que M. Fomm dans des conditions comparables (*loc. cit.*, t. LXVIII, p. 903-916; 1899).

M. Villari a retrouvé (*Lincei*, 11 juin 1898), sans les expliquer, des maximums et minimums d'impression dans les radiographies obtenues avec des tubes de Crookes et aussi avec des tubes focus. Dans ce dernier cas, les pénombres les plus larges sont fournies par la source étendue constituée par le verre du tube focus, qui émet des rayons de Röntgen sous l'influence des rayons cathodiques diffusés par la lame focus.

est, en effet, plus vivement éclairé, dans sa moitié droite, que le cercle π_1, relatif à un point voisin, et il l'est autant dans sa moitié gauche ([1]).

En résumé, les phénomènes ne paraissent pas explicables au moyen d'une *irradiation*, en entendant par ce mot la diffusion, sans transformation, des rayons incidents autour de chaque point de la couche sensible. Mais ils pourraient *peut-être* s'expliquer par une *émission secondaire de rayons transformés* capables de *détruire* en partie l'effet des rayons incidents, de même que l'action d'une lumière rouge sur une plaque photographique est capable, dans certaines conditions, de diminuer ou même d'effacer l'*impression* due à une action antérieure d'une lumière bleue. Du moins, je pense que le phénomène tient à ce que *soit la formation de l'image latente* lors de l'action des rayons sur la couche sensible, *soit la formation du dépôt d'argent dans le bain de développement*, ou, de même, la production de l'image visuelle sur la rétine, provoquent en chaque point une modification de la couche photographique ou rétinienne jouissant des deux propriétés suivantes : cette modification s'oppose en chaque

---

([1]) Ici l'intensité de l'éclairement en π_1 n'est pas nulle. Au contraire, dans l'expérience des deux fentes (*fig.* 3 et *fig.* 5), l'intensité de l'éclairement s'évanouit aux bords o, o' de la pénombre (*fig.* 3). L'éclairement étant nul en p, à gauche de o ou à droite de o', il ne peut plus y avoir de *minimum* en o, ni o'. Mais on conçoit que l'impression photographique, après avoir diminué de α vers o à partir du maximum α, *se relève* avant d'atteindre le bord géométrique o de la pénombre, parce que l'effet secondaire destructeur en o, insignifiant dans le demi-cercle de droite, est nul dans le demi-cercle de gauche; et, en effet, sur les photographies ou radiographies obtenues, on voit à droite de o et à gauche de o' (*fig.* 3) un maximum d'impression séparé naturellement du reste de la pénombre par un minimum; les deux minimums ainsi produits vers les deux bords de la pénombre seraient, dans cette manière de voir, purement *relatifs*, comme le minimum m compris entre α et α'; ils sont très nettement éloignés des bords o et o' de la pénombre, tout près desquels se trouvent les maximums signalés.

point à la continuation de l'action première des rayons ; elle se transmet autour de chaque point dans un petit cercle d'activité. Admettre, dans le cas de la photographie, que le phénomène se produit pendant l'opération chimique du développement reviendrait à dire que chaque élément de la couche sensible emprunte, par diffusion, aux éléments voisins une partie de leur sel d'argent. De même, dans le cas de la vision, la perception de l'image rétinienne exigerait une opération chimique dont les matériaux seraient des substances susceptibles de diffusion, capables de se transporter rapidement d'un élément de la rétine à un élément suffisamment voisin.

Je ne puis actuellement rien dire qui permette de rejeter cette dernière forme d'hypothèse. Mais voici un argument plutôt en faveur de la forme de l'hypothèse qui fait intervenir seulement la formation de l'image latente, indépendamment des particularités du développement, et qui pourrait être *en particulier* l'hypothèse indiquée tout à l'heure des *rayons transformés destructeurs :* cette hypothèse, en effet, s'appliquerait encore au cas de l'*impression uniforme d'une surface sensible, sans aucune variation de l'éclairement* dans l'intérieur du contour qui limite la surface. Or l'expérience a démontré, du moins dans le cas de la lumière, que, si le temps de l'illumination de la couche sensible va en augmentant, l'image latente se développe en noir de plus en plus intense *jusqu'à une certaine limite seulement ;* cette limite une fois atteinte, *l'intensité du dépôt d'argent produit par le développement va en diminuant* et, pour un temps d'exposition suffisant, peut même devenir assez faible (*état neutre*). Cela me paraît inexplicable autrement que par l'hypothèse d'une double action de la lumière : il y aurait, je pense : 1° une modification du sel d'argent telle que les particules ainsi altérées jouissent désormais d'un ensemble

de propriétés nouvelles [1] dont l'une serait celle d'*être réduites* dans le bain de développement, bien qu'il ait été jusqu'ici impossible de déceler aucune décomposition chimique du sel d'argent insolé *avant qu'il soit plongé*

(1) J'ai insisté dans une Note des *Comptes rendus de l'Académie, des Sciences* (t. CXXV, p. 168; 19 juillet 1897), et aussi *Revue générale des Sciences* (30 avril 1898) sur l'idée qu'une même substance exposée à un rayonnement acquiert d'un seul coup un ensemble de *propriétés nouvelles* qui sont autant d'*aspects divers* d'une *même modification* de l'état du corps; telles sont : la *conductibilité électrique* des sels d'argent insolés (S. Arrhenius, *Wien. Berichte* (2), t. XCVI, p. 837; 1887); l'*image latente* acquise par les mêmes sels sous l'influence des mêmes radiations, c'est-à-dire la propriété de noircir ultérieurement dans le bain de développement photographique; la *conductibilité électrique du soufre insolé* (Monckmann, *Proc. R. S. L.*, t. XLVI, p. 136) et la propriété du soufre insolé de noircir à la vapeur de mercure pour donner une sorte d'*image photographique* qui peut, comme je m'en suis assuré, *se renverser par une surexposition prolongée au soleil;* la *variation de la conductibilité électrique du sélénium* exposée à la *lumière* (W. Smith, *Amer. Journ. of Sc.*, t. V, p. 302; 1881, et t. XX, p. 178; 1885), laquelle dure un temps appréciable (Bellati et Romanese, *Nuovo Cimento* (3), t. XI, p. 5; 1882. Majorana, *loc. cit.* (3), t. XXXV, p. 267; 1894) et change beaucoup (même de sens) avec la variété de sélénium employée (Fritts, *Proceed. Amer. Ass.;* 1884. S. Kalisher, *Wied. Ann.*, t. XXXII, p. 108; 1887), qui augmente beaucoup quand on passe du sélénium amorphe au même sélénium maintenu longtemps à 210°, puis cristallisé par refroidissement (W. Siemens. *Pogg. Ann.*, t. CLVI, p. 334; 1875); ces particularités ne sont ni plus ni moins singulières que les variations de sensibilité d'une émulsion photographique selon son mode de préparation; par exemple, la plus grande sensibilité du sélénium recuit de Siemens devenu cristallin n'est peut-être pas sans analogie avec la plus grande sensibilité que le gélatinobromure acquiert par la cuisson (mûrissement de l'émulsion) en même temps qu'il acquiert un grain plus gros. Ce phénomène de la variation de conductibilité du sélénium a aussi été observé *sous l'action des rayons de Röntgen* (Richard Threlfall et James Arthur Pollock, *Phil. Mag.*, 5e série, t. XLII, p. 453, et Perreau, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXIX, p. 956). Enfin, j'ai insisté dans la même Note sur l'intérêt du rapprochement des deux phénomènes suivants : 1° *phosphorescence* (ou *fluorescence*), d'une manière générale : *luminescence;* et 2° *actions photographiques*. Ce rapprochement permet de mieux comprendre les belles expériences de Niepce de Saint-Victor (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences* t. LXV, p. 505; t. LIII, p. 33, etc.) sur l'ac-

dans le bain révélateur; 2° une sorte de *réaction* du sel d'argent contre la modification précédente, *réaction qui s'opposerait à la continuation de la modification qui l'a excitée.* Cette réaction dont l'existence pourrait peut-être avoir quelque analogie avec la loi de Lenz, aurait, en particulier, les deux propriétés suivantes : 1° elle se transmettrait d'un point à un autre, peut-être par rayonnement

---

tivité rayonnante des corps insolés; il permet de ramener à un seul phénomène les deux faits suivants : 1° des rayons lumineux peuvent détruire l'image latente produite par des rayons de *longueurs d'onde différentes,* phénomène remarquable surtout en daguerréotypie (Claudet, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3ᵉ série, t. XXII, p. 332); les rayons rouges font complètement disparaître, après un certain temps, la propriété de fixer la vapeur de mercure que les rayons bleus, par exemple, ont antérieurement communiquée à la plaque de Daguerre; 2° les rayons lumineux rouges ou infra-rouges peuvent détruire l'état spécial qui caractérise un corps, insolé à la lumière bleue ou ultra-violette, par exemple; ils provoquent alors, sous forme d'émission lumineuse (*phosphorescence activée*), le dégagement de l'énergie emmagasinée par le corps lors de son illumination (Becquerel, *la Lumière*).

Sur ces derniers points il y a une certaine *analogie entre les rayons de Röntgen et les rayons lumineux.* M. P. Villard a en effet montré que les écrans fluorescents au platinocyanure de baryum ou de potassium employés en Radioscopie perdent partiellement leur sensibilité sous l'action prolongée des rayons de Röntgen; on leur rend cette sensibilité en les exposant à la lumière, d'où l'auteur tire des effets d'aspect curieux (expériences de l'*écran magique; Société française de Physique,* séance du 20 mai 1898). J'ai fait remarquer (*loc. cit.*, à la suite de la Communication de M. P. Villard) que ces expériences de l'écran magique viennent appuyer par un bel exemple les *analogies* que j'avais signalées antérieurement (*voir* plus haut) entre les modes d'action des rayons de Röntgen et des rayons lumineux sur les *corps luminescents,* et je rappelais à cette occasion les phénomènes analogues présentés par les *plaques photographiques.* Justement j'ai pu constater plus tard et signaler incidemment (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXVIII, p. 300; 30 janvier 1899) le fait que des rayons lumineux peuvent parfois diminuer l'action photographique antérieure ou simultanée des rayons de Röntgen. M. P. Villard a étudié en détail ce phénomène à la même époque (*Société française de Physique,* séance du 17 février 1899; *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXVIII, p. 237; 23 janvier 1899) et a signalé de son côté l'analogie qu'il présente avec les phénomènes de *renversement* de l'image latente daguerrienne.

(hypothèse des rayons secondaires destructeurs issus d'une transformation), et, par suite, expliquerait, comme il a été dit, les maximums et minimums d'impression photographique; 2° elle se développerait avec un certain *retard* dépendant des propriétés intimes des couches photochimiques, de même que l'hystérésis magnétique dépend des propriétés moléculaires du corps soumis à l'aimantation; la vitesse de son action, destructive de la modification du sel d'argent, augmenterait à chaque instant avec l'intensité de la modification du sel d'argent relative à une époque antérieure.

Or le calcul montre [1] qu'une action positive croissant avec le temps, et une action négative en retard sur l'action positive et dont la vitesse croît avec l'impression *résultante* relative à une époque antérieure, donnent une impression résultante qui croît jusqu'à une certaine époque pour laquelle elle est maximum, puis diminue jusqu'à un minimum qui peut être assez faible, augmente de nouveau jusqu'à un certain maximum et passe par une série d'oscil-

---

[1] En particulier, admettons que l'impression i à l'instant t puisse être représentée par l'excès d'un effet positif $p = at$, croissant proportionnellement au temps, sur un effet négatif n dont la vitesse $\frac{dn}{dt}$ à chaque instant t est proportionnelle à l'impression résultante i relative à un instant antérieur $(t - t_0)$. Nous avons alors les relations

$$i(t) = p(t) - n(t) \qquad \text{et} \qquad \frac{dn}{dt} = bi(t - t_0).$$

Si le retard t_0 était nul, la solution du problème serait

$$i = \frac{a}{b} - \frac{1}{b} e^{c-bt},$$

a, b, c étant trois constantes, c'est-à-dire une fonction i croissant avec le temps de plus en plus lentement et tendant vers une limite $\frac{a}{b}$ pour un temps infini. Mais, à cause du retard fini t_0, la solution du problème est une fonction $i(t)$ qui présente une *série d'oscillations rapidement amorties*. Il est facile de le prévoir indépendamment de tout calcul :

lations de plus en plus faibles pour tendre assez rapidement vers un effet limite désormais invariable. Le maximum d'impression est donc expliqué, ainsi que le minimum assez faible qui le suit. L'expérience a montré précisément que ce minimum est suivi d'un second maximum, et la rapidité avec laquelle les oscillations du phénomène s'amortissent semble seule avoir empêché d'en compter un grand nombre ([1]). Ainsi seraient expliqués, du même coup, la production de maximums et minimums apparents d'éclairement (*pseudo-franges*) et les phénomènes de *renversement de l'image latente* ([2]).

7. *Conclusions expérimentales.* — D'une part, il existe de profondes différences entre les rayons de Röntgen et tous les rayons lumineux connus : absence de diffraction, de réfraction, de réflexion régulière, de polarisation. Mais, d'autre part, les singularités que l'on avait cru constater dans leur mode de propagation et dans la formation des silhouettes radiographiques s'évanouissent à la suite

Quand i augmente, $\frac{dn}{dt}$ augmente aussi et atteint progressivement la valeur a de $\frac{dp}{dt}$; à ce moment, $\frac{di}{dt} = 0$ et la valeur de i est stationnaire; mais, comme $\frac{dn}{dt}$ augmente en même temps que l'impression $i(t - t_0)$ relative à une époque *antérieure*, la vitesse $\frac{dn}{dt}$ de l'effet négatif continue encore à augmenter et devient supérieure à $\frac{dp}{dt}$, en sorte que l'effet résultant i diminue après avoir passé par un *maximum*; un temps t_0 après ce maximum, $\frac{dn}{dt}$ diminue à son tour et finit par redevenir égal à $\frac{dn}{dt}$, ce qui rend i minimum, etc. Un graphique fait d'ailleurs comprendre aisément le rapide amortissement des oscillations de i.

([1]) M. Janssen en a compté trois (*Comptes rendus*, t. XCI, p. 199; 26 juillet 1880).

([2]) Si cette explication de la limite maximum de l'action photographique est exacte, on doit chercher, pour augmenter la sensibilité des préparations photographiques, à reconnaître si la *réaction photographique* est due par exemple à des radiations transformées, et, dans ce cas, s'efforcer de diminuer l'intensité de cette sorte de luminescence nuisible de la préparation sensible.

d'un examen attentif, en sorte qu'il ne reste plus un seul des phénomènes qui semblaient déceler dans ces rayons une nature essentiellement distincte de celle de la lumière. Bien plus, toutes ces particularités qui se groupent autour de deux cas principaux : déformations des silhouettes et variations apparentes de l'éclairement, sont tout à fait semblables à celles que présentent les rayons lumineux, réserve faite du cas de la diffraction, de la réfraction ou de la réflexion régulière.

8. *Considérations théoriques.* — Avant d'exposer la suite de ces recherches expérimentales, il n'est pas sans intérêt de passer en revue les diverses hypothèses que l'on peut émettre au sujet de la nature des rayons de Röntgen.

L'auteur de leur découverte insiste, dans son premier Mémoire, sur l'indifférence qu'ils présentent vis-à-vis des moyens par lesquels nous savons agir sur la direction des rayons lumineux, sur leurs vibrations. Il déclare que l'hypothèse de *vibrations longitudinales* de l'éther lui semble de plus en plus vraisemblable ([1]). Dans son troisième Mémoire, il insiste sur l'analogie que présente la loi d'absorption des rayons X par les divers corps avec la loi d'absorption des *rayons cathodiques*, qui semble réglée principalement par la quantité de matière traversée; il considère comme assez vraisemblable l'hypothèse qui assimilerait les rayons qu'il a découverts à une espèce particulière de rayons cathodiques ([2]). Cette seconde hypothèse présente cette difficulté : les rayons cathodiques sont chargés d'électricité négative; dans l'état actuel des faits, on les définirait même volontiers comme un bombardement d'électricité négative issue de la cathode d'un tube de Crookes en activité; c'est l'ancienne *matière radiante* de Crookes qui en avait pressenti l'électrisation

---

([1]) RÖNTGEN, 1er Mémoire, *Wied. Annalen d. Physik*, t. LXIV, p. 11 1898.

([2]) RÖNTGEN, 2e Mémoire, *loc. cit.*, p. 32.

négative sans pouvoir la démontrer nettement ([1]); les rayons cathodiques ainsi formés d'un véritable *courant électrique de convection* sont *déviables à l'aimant,* et c'est même leur propriété la plus anciennement connue ([2]); ils sont, pour la même raison sans doute, déviés par le champ électrique ([3]). Or, il a été jusqu'ici impossible de déceler une déviation magnétique des rayons de Röntgen et les résultats annoncés à ce sujet ont été reconnus inexacts ([4]). D'autre part, il a été impossible de démontrer que ces rayons sont électrisés : dans une expérience que M. P. Curie et moi avons faite à ce sujet, nous avons pu reconnaître que le courant équivalent à la circulation possible de l'électricité dans un faisceau assez intense de rayons de Röntgen était certainement inférieur à 10^{-12} ampère ([5]).

La seconde hypothèse du professeur Röntgen conduirait donc à admettre qu'il existe des rayons cathodiques extrêmement différents des divers rayons jusqu'ici désignés sous ce nom ; ces rayons, relativement très pénétrants, seraient extrêmement peu électrisés et extrêmement peu déviables par le champ magnétique, de façon que ces

---

([1]) Cette importante démonstration a été faite par M. J. Perrin (*Comptes rendus,* t. CXXI, p. 1130; 30 décembre 1895. *Thèse de Doctorat,* p. 11 ; 1897; ou *Ann. de Chim. et de Phys.,* 7e série, t. XI, p. 496). *Voir,* sur la même question, les Mémoires postérieurs de J.-R. Mac-Clelland, *Proc. of Roy. Soc.,* t. LXI, p. 227 ; 1897. — J.-J. Thomson, *Phil. Mag.* (5), t. XLIV, p. 293 ; 1897. — W. Wien, *Verhandl. d. Phys. Gesellsch. zu Berlin,* t. XVI, p. 165; 1897. — P. Lenard, *Wied. Annalen d. Physik,* t. LXIV, p. 279, et t. LXV, p. 504; 1898.

([2]) Hittorf, *Ueber die Electricitätsleitung der Gase* (*Pogg. Annalen d. Physik*, t. CXXXVI, p. 1 ; 1869).

([3]) Goldstein, *Comptes rendus,* t. CXXVI, p. 1199. — Deslandres, *loc. cit.,* t. CXXIV, p. 678; 1897. — Majorana, *Lincei,* p. 183; 1897. — J. Perrin, J.-J. Thomson, W. Wien, P. Lenard, *loc. cit.* — P. Lenard, *Wied. Annalen d. Physik,* t. LXV, p. 500; 1898. — W. Kaufmann, *Verhandl. d. Phys. Gesellsch. zu Berlin,* t. I, p. 88; 1899.

([4]) *Voir* p. 19 de ce Travail.

([5]) *Comptes rendus,* t. CXXX, p. 1013; 9 avril 1900.

Nous employions une enceinte de Faraday en plomb épais de forme cubique, ayant 0m,23 de côté, reliée à un électromètre à quadrants. Un large faisceau de rayons de Röntgen y pénétrait par une ouverture

propriétés nous demeureraient actuellement cachées. On sait que les rayons de Röntgen prennent naissance quand les rayons cathodiques d'un tube à vide frappent une paroi de verre, de platine ou d'une substance quelconque. Il est établi que, en même temps, le corps frappé par les rayons cathodiques les diffuse en tous sens ([1]) et les rayons cathodiques ainsi diffusés ne peuvent, pas plus que les rayons incidents, traverser sensiblement la paroi de verre du tube; les rayons cathodiques peuvent seulement traverser une feuille très mince d'un corps léger, par exemple quelques microns d'aluminium ; encore une telle feuille ne transmet-elle pas les rayons cathodiques en ligne droite : elle les *diffuse* en tous sens sans paraître en modifier notablement la nature; c'est ce qui arrive, en particulier, dans l'expérience qui a permis au professeur Lenard ([2]) de *faire sortir* les rayons cathodiques du tube à vide où ils ont pris naissance; les rayons cathodiques extérieurs ainsi obtenus par diffusion à travers la mince paroi d'aluminium battu (*rayons de Lenard*), absorbables par quelques centimètres d'air atmosphérique, sont, comme les rayons dont ils proviennent, chargés d'électricité négative ([3]), déviables par l'aimant, par le champ élec-

---

circulaire de $0^m,10$ de diamètre, placée à $0^m,07$ seulement de la lame focus du tube à rayons de Röntgen. L'enceinte de plomb, y compris son ouverture, était complètement enveloppée par une couche continue d'un *diélectrique solide* (paraffine ou ébonite), recouverte elle-même d'aluminium mince en communication avec la terre. *L'enveloppe continue de diélectrique solide est nécessaire pour maintenir l'isolement parfait* du cylindre, qui, sans cette précaution, ne demeurerait pas isolé dans l'air ambiant rendu conducteur de l'électricité par l'action des rayons de Röntgen.

([1]) Goldstein, *Monatsber. d. berliner Akademie*, p. 775; 1881. — P. Villard, *Société française de Physique*, 2 avril 1897; *Comptes rendus*, t. CXXVII, p. 223; 1898. — E. Wiedemann, *in* Lamotte, *L'Éclairage électrique*, t. XIII, p. 445.

([2]) P. Lenard, *Wied. Annalen d. Physik*, t. LI, p. 225; 1894; t. LII, p. 23; 1894. Mémoires traduits en français dans la *Lumière électrique*, t. LII, p. 291, 338, 439, 537; 1894.

([3]) P. Lenard et les auteurs cités p. 36, note 1.

trique (¹) et capables à leur tour de provoquer l'émission des rayons de Röntgen quand ils frappent un corps quelconque. — Il faudrait donc admettre qu'une partie des rayons cathodiques rencontrant un obstacle matériel serait transformée en une autre variété de rayons cathodiques beaucoup plus pénétrants, les rayons X, tandis qu'une autre partie serait disséminée sans transformation bien profonde. Or, si l'on conçoit une dissémination ou une nouvelle émission en tous sens de particules électrisées, on conçoit moins une transformation des rayons cathodiques en rayons X, capable de rendre insensibles l'électrisation et les phénomènes qui en dérivent, sans cependant supprimer cette propriété.

Au contraire, on voit bien que l'arrêt brusque des charges électriques transportées par les rayons cathodiques doit provoquer, en vertu d'un effet d'induction électromagnétique, une émission d'impulsions de l'éther. Cette manière de voir émise par le professeur Stokes (²) a été développée par le professeur J.-J. Thomson (³) à l'aide de la théorie électromagnétique de Maxwell ; il résulte de cette théorie que des particules électrisées se déplaçant avec une vitesse égale à une fraction de celle de la lumière doivent, en frappant la paroi de verre ou la lame focus de platine d'un tube à vide, provoquer une émission d'impulsions isolées de l'éther, la longueur occupée dans l'espace par chaque impulsion étant de l'ordre des épaisseurs des particules électrisées. Le professeur Stokes a

---

(¹) *Cf.* p. 36, note 3.

(²) Sir G. Stokes (*Wilde Lecture. Proced. of the Manchester Literary and Philosophical Society*, t. XLI ; conférence du 2 juillet 1897 traduite *in extenso* dans l'*Éclairage électrique*, t. XIV, p. 374 ; 1898).

(³) J.-J. Thomson, *A theory of the connexion between cathode and Röntgen rays* (*Phil. Mag.*, 5ᵉ série, t. XLV, p. 172 ; 1898). La vitesse de propagation des rayons cathodiques atteint jusqu'à $\frac{1}{3}$ de celle de la lumière ; *voir* sur cette question : J.-J. Thomson, W. Wien, P. Lenard (Mémoires déjà cités, p. 36, note 1). — Wiechert, *Wied. Annalen d. Physik*, t. LXIX, p. 739 ; 1899.

déjà montré que la diffraction doit être insensible pour de pareils ébranlements. Reste à montrer que les rayons ainsi constitués ne peuvent se réfracter.

Je suis arrivé à cette conclusion que des vibrations ultra-ultraviolettes de longueurs d'onde sensiblement inférieures aux doubles des distances mutuelles des particules des corps se propageraient sans réfraction à travers les prismes. La manière de voir qui me conduit à ce résultat consiste à regarder les particules matérielles comme des centres de réflexion des vibrations de l'éther; en l'appliquant à la transmission de la lumière dans les milieux en repos ou en mouvement, j'avais pu, en particulier, me rendre compte très exactement de la remarquable expérience d'entraînement des ondes lumineuses par l'eau en mouvement qui les transmet, réalisée en 1851 par Fizeau. Or, mes raisonnements s'étaient adaptés immédiatement aux rayons ultra-ultraviolets.

L'absence de réfraction se retrouve dans ma manière de voir quand les longueurs d'onde des rayons sont notablement inférieures aux doubles des distances des particules, ou quand les rayons sont formés d'un succession de petits trains de vibrations amorties, la longueur de chaque train étant inférieure à la même limite. L'extrapolation de la théorie de Helmholtz donne aussi le même résultat, mais seulement quand la longueur d'onde tend vers zéro (1). Ma manière de voir a l'avantage de ne pas faire intervenir la transversalité des vibrations; elle s'applique aussi bien à des vibrations longitudinales qu'à des vibrations transversales de l'éther (2).

L'hypothèse ondulatoire, telle que je l'ai développée,

---

(1) *Cf.* Raveau, *Journal de Phys.*, 3e série, t. V, p. 113; 1896.

(2) *Journal de Physique*, 3e série, t. IX, p. 188; 1900. Je possédais les résultats indiqués dans cet article quelques années déjà avant la découverte du professeur Röntgen

conduit immédiatement à ce résultat qu'un milieu *pur* et *homogène* est nécessairement un *milieu trouble* pour des vibrations dont la longueur d'onde n'est pas trop supérieure aux distances moyennes des particules du milieu ([1]). J'ai été ainsi conduit à étudier la *dissémination des rayons de Röntgen* par les différents corps. Ces phénomènes de dissémination dominent l'optique des rayons de Röntgen au même titre que la propagation rectiligne; les propriétés qu'ils révèlent dans les rayons de Röntgen sont très différentes de celles que présentent les divers rayons cathodiques jusqu'ici étudiés.

SECONDE PARTIE.

RAYONS SECONDAIRES DÉRIVÉS DES RAYONS DE RÖNTGEN.

Un faisceau de rayons de Röntgen pénètre dans la matière en s'y affaiblissant graduellement sans que ses trajectoires rectilignes cessent d'être bien définies; mais chaque élément de matière rencontré par les rayons émet en tous sens des rayons que j'appelle *secondaires* pour indiquer qu'ils dérivent des rayons de Röntgen issus du tube à vide ou rayons *primaires;* ces expressions n'impliquent aucune hypothèse. Les rayons secondaires peuvent à leur tour se disséminer pour donner des rayons *tertiaires*. Ce qui distingue ces phénomènes de *dissémination* d'une *diffusion pure*, c'est qu'ils sont accompagnés d'une *trans-*

([1]) *Loc. cit.*, p. 189.

formation des rayons de Röntgen : les rayons secondaires ou tertiaires sont souvent beaucoup *moins* pénétrants que les rayons primaires qui les produisent.

On sait, d'après une expérience fondamentale du professeur Röntgen, que les rayons découverts par lui provoquent, en frappant le platinocyanure de baryum, une émission de lumière visible. Plusieurs autres corps, comme la plupart des platinocyanures, le tungstate de calcium, etc., sont aussi *luminescents* sous l'action des rayons de Röntgen. La couleur de la lumière varie avec le corps qui en est la source. On connaît même un corps, le *spath fluor,* qui émet, sous l'influence des rayons de Röntgen, des rayons *ultra-violets* (¹) très voisins des rayons de la raie 25 du cadmium. Ces phénomènes de transformation des rayons de Röntgen en rayons lumineux peuvent être désignés sous le nom de *radioluminescence,* analogue à l'expression de *photoluminescence* employée par le professeur E. Wiedemann pour désigner les transformations des rayons lumineux par les corps fluorescents ou phosphorescents. *Il ne faut pas les confondre avec les phénomènes d'émission secondaire.* La radioluminescence se présente seulement avec certains corps; elle peut varier énormément avec le degré de division de ces corps ou l'état de poli de leur surface; par exemple, les rayons invisibles et réfrangibles émis par le spath fluor sous l'influence des rayons de Röntgen sont beaucoup plus intenses lorsque le spath fluor est réduit en poudre ou dépoli que lorsqu'il est en masse compacte polie. Au contraire, l'émission secondaire se présente avec les matières les plus diverses; son intensité et la transformation qui l'accompagne dépendent principalement de la nature des éléments chimiques que renferme le corps frappé

(¹) WINKELMANN et STRAUBEL, *Ueber einige Eigenschaften der Röntgenstrahlen* (*Jenaische Zeitschrift für Naturw.*, t. XXX; 1896).

par les rayons de Röntgen, sans que l'état de division paraisse influer notablement ([1]).

CHAPITRE PREMIER.

COMPARAISON DES RAYONS SECONDAIRES ET DES RAYONS DE RÖNTGEN.

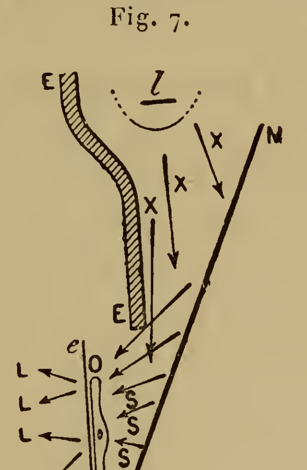
1. *Actions à distance des rayons secondaires.* — On peut déceler à distance la présence des rayons secondaires disséminés par un corps quelconque au moyen des trois principaux modes d'action employés pour reconnaître les rayons X : l'*action sur les couches sensibles* employées en photographie (*action radiographique*), l'*excitation de la luminescence des platinocyanures* (*action radioscopique*), la *décharge des conducteurs électrisés* (*action électroscopique*).

([1]) Avant la publication de mes expériences, on ignorait les phénomènes de *transformation* des rayons de Röntgen par la matière. Quelques observateurs avaient indiqué que certains corps frappés par les rayons de Röntgen agissaient à distance sur les plaques photographiques. Mais on n'avait même pas démontré qu'il s'agissait d'une propagation en ligne droite de rayons capables d'agir sur les mêmes récepteurs que les rayons de Röntgen ; le rôle capital de ces rayons dans la décharge des conducteurs frappés par les rayons de Röntgen était inconnu, aussi bien que les phénomènes de transformation des rayons de Röntgen par les métaux.

Le professeur Röntgen, dans son premier Mémoire, avait montré que, si l'on place des lames de divers métaux contre la couche sensible d'une plaque photographique recevant des rayons X par sa face verre, l'action photographique de ces derniers est renforcée sur les régions de la couche sensible placées en face des lames métalliques. Mais il n'aperçut pas la transformation des rayons incidents et admit que les métaux les *réfléchissaient* irrégulièrement. Dans son troisième Mémoire, il explique qu'il a observé la dissémination des rayons X par

Le dispositif le plus simple consiste à faire tomber les rayons X, issus de la lame focus l (*fig.* 7) d'un tube à

Fig. 7.



vide, sur la surface d'un corps quelconque MM pris, par exemple, sous forme de plaque; on place devant MM un

---

l'air au moyen de l'écran luminescent au platinocyanure de baryum (*Wied. Annalen d. Physik,* t. LXIV, p. 18; 1898). Il indique un résultat négatif relatif à la dissémination par l'aluminium (*loc. cit.,* p. 24). Il se pose la question de savoir si la dissémination est analogue à la réflexion diffuse ou à la fluorescence, mais sans pouvoir la résoudre (*loc. cit.,* p. 19-20). Voici le passage où il le déclare : « Die Frage, ob die von den bestrahlten Körpern ausgehenden Strahlen derselben Art sind wie die auffallenden, oder, mit anderen Worten, ob eine diffuse Reflexion oder ein der Fluorescenz ähnlicher Vorgang die Ursache dieser Strahlen ist, habe ich noch nicht entscheiden können. » Ce troisième Mémoire du professeur Röntgen a paru d'abord dans les *Sitzungsberichte der Akad. der Wissenschaften zu Berlin*, mai 1897, puis dans l'*Éclairage électrique* du 17 juillet 1897 qui me l'a fait connaître. J'ai aussitôt publié dans les *Comptes rendus de l'Acad. des Sc.* des 19 et 26 juillet 1897 (t. CXXV, p. 168 et 230) mes premiers résultats relatifs à la transformation des rayons de Röntgen, obtenus déjà en décembre 1896 et communiqués à cette époque à M. E. Bouty, Directeur du Laboratoire d'enseignement de la Physique à la Sorbonne, où ont été effectuées toutes ces recherches. Mes autres Notes aux *Comptes rendus* sur la même question se trouvent : t. CXXV, p. 942; t. CXXVI, p. 36, 467, 521 et 887; t. CXXVII, p. 46; t. CXXVIII, p. 300 et 546; t. CXXX, p. 320 et 1013. La dernière Note a été publiée en collaboration avec M. P. Curie.

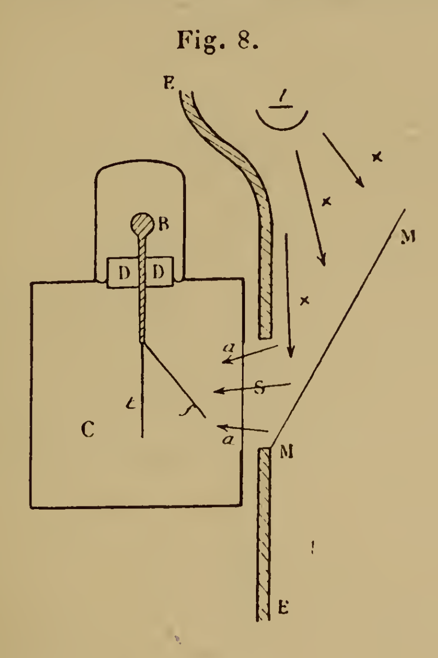
écran au platinocyanure de baryum *ee*, protégé par un écran de plomb EE contre l'action directe des rayons X. Quand le tube à rayons X est excité, l'écran *ee* émet des rayons lumineux L, comme s'il recevait des rayons X. Ces rayons lumineux L sont excités par les rayons secondaires S qu'émet le corps MM sous l'influence des rayons X. Ces rayons S projettent sur l'écran *ee* la silhouette d'un objet OO, tel que la main, appliqué derrière l'écran.

Pour augmenter la luminosité de l'écran, il y a avantage à ne pas adosser la couche de platinocyanure à une lame plus ou moins épaisse de carton noir qui arrêterait notablement les rayons secondaires dans certains cas; il vaut mieux former la couche luminescente d'une mince feuille de collodion obtenue par coulage sur verre et saupoudrée de platinocyanure avant le moment de la dessiccation; on adosse cette pellicule luminescente à une feuille de papier blanc glacé qui renvoie à travers la mince pellicule une grande partie de la lumière émise par le platinocyanure et augmente beaucoup l'éclat de la luminescence; pour empêcher la lumière étrangère d'agir, on recouvre la feuille de papier blanc d'une simple feuille de papier noir, ou bien l'on opère dans l'obscurité, le tube à rayons X étant enfermé dans une boîte de papier noir. Si la face de l'écran luminescent recouverte de platinocyanure est nue et tournée vers la source MM des rayons secondaires, on peut aussi adosser la pellicule de collodion à un miroir métallique. Ces précautions sont encore utiles à prendre pour la *radioscopie* par les rayons X eux-mêmes.

L'*action radiographique* des rayons X se constate en remplaçant dans l'expérience précédente l'écran luminescent *ee* par une couche sensible, plaque ou pellicule photographique, dont la face sensible est tournée vers MM et protégée contre la lumière par une enveloppe de papier noir, ou bien nue, si l'on opère dans l'obscurité, le tube à rayons X étant enfermé dans une boîte de papier noir.

L'action électroscopique des rayons S se constate très nettement en les recevant dans la cage C d'un électroscope (*fig.* 8) à travers une feuille mince *aa* en aluminium

Fig. 8.



battu qui arrête les lignes de force du champ électrique intérieur à l'électroscope. La décharge de l'électroscope, protégé contre les rayons X par l'écran de plomb EE ne peut être due qu'à l'action à distance du corps MM frappé par les rayons X. Elle se produit, comme sous l'influence des rayons X, complètement, quel que soit le signe de la charge de la feuille d'or *f*.

L'illumination de l'écran au platinocyanure (*action radioscopique*) et l'action radiographique se manifestent en même temps que l'action électroscopique et réciproquement. Toutefois, l'action électroscopique du zinc, par exemple, dans l'expérience de la *fig.* 8, son action radiographique dans l'expérience de la *fig.* 7, sont beaucoup plus grandes que les actions correspondantes de l'aluminium, tandis que l'action radioscopique du zinc dans l'expérience de la *fig.* 7 n'est pas beaucoup plus grande que celle de l'aluminium. Si, par exemple, une plaque

photographique, dans l'expérience de la *fig.* 7, est impressionnée nettement en une minute par les rayons secondaires d'une lame MM de zinc ou de fer, dans les mêmes conditions l'action radiographique d'une plaque épaisse de paraffine ou d'aluminium passe inaperçue, à moins qu'on n'augmente beaucoup le temps de pose. Dans l'expérience de la *fig.* 8, le mouvement de chute de la feuille d'or *f* est très lent si MM est une plaque de paraffine ou d'aluminium, mais se fait très rapidement si MM est une lame de zinc, de fer, en sorte qu'une grande déviation de la feuille d'or *f* disparaît, par exemple, en une seconde. Cette différence entre les activités de divers corps, surtout fréquente lorsqu'on compare un corps léger avec un corps lourd, distingue pratiquement le récepteur luminescent, qui la fait reconnaître assez faiblement, et les récepteurs photographiques ou électriques, qui la montrent avec une très grande netteté ([1]).

Quand on emploie la méthode radiographique, il faut éviter que des effluves électriques émanées de l'appareil producteur de rayons X ne viennent impressionner la couche sensible; il suffit pour cela d'entourer, soit l'appareil producteur de rayons X, soit la plaque sensible employée, d'une enveloppe d'aluminium reliée au sol; dans le second cas, il est utile que le corps émettant les rayons secondaires soit enfermé dans la même enceinte d'aluminium; de cette manière les rayons secondaires n'ont point à traverser l'épaisseur de l'aluminium. Je me suis assuré, par ces divers moyens, que les effluves électriques n'intervenaient pas dans mes expériences. En second lieu, les métaux, en l'absence des rayons X, exercent une action spontanée sur les couches sensibles, soit au contact, soit

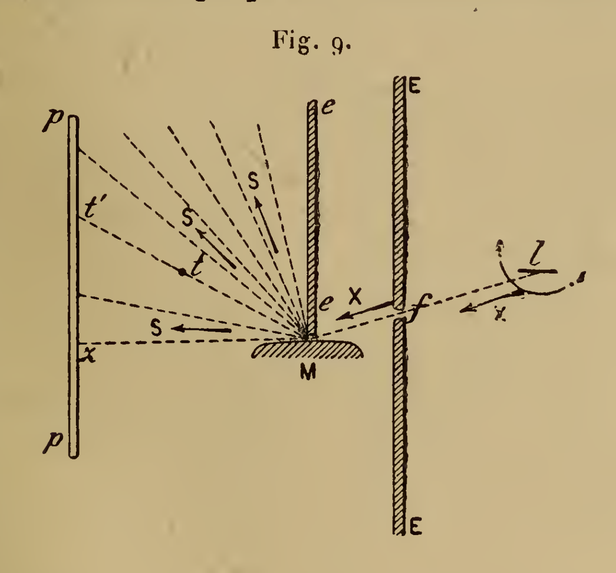
([1]) Je l'ai reconnue au début de mes recherches (*Comptes rendus*, t. CXXV, p. 231; 26 juillet 1897), et je l'ai précisée quand j'ai étudié l'action radioscopique des rayons secondaires (*Comptes rendus*, t. CXXVI, p. 887; 21 mars 1898).

à distance: mais il faut des jours pour que l'action spontanée d'un métal puisse s'exercer, même au contact de la couche sensible nue. Je me suis assuré que cette action spontanée était tout à fait insensible pendant la durée relativement très faible de mes expériences.

2. *Propagation rectiligne.* — Pour justifier l'expression de *rayon* et démontrer que l'*émission secondaire* se fait en ligne droite, j'ai utilisé la propriété remarquable suivante : l'émission seconda re se fait en tous sens autour de chaque élément de matière frappé par les rayons X; si ces rayons rencontrent la surface bien plane d'un miroir, les rayons secondaires qu'ils excitent sont émis jusque dans le plan voisin de la surface du miroir.

J'ai constaté cette propriété en faisant tomber, sur un

Fig. 9.

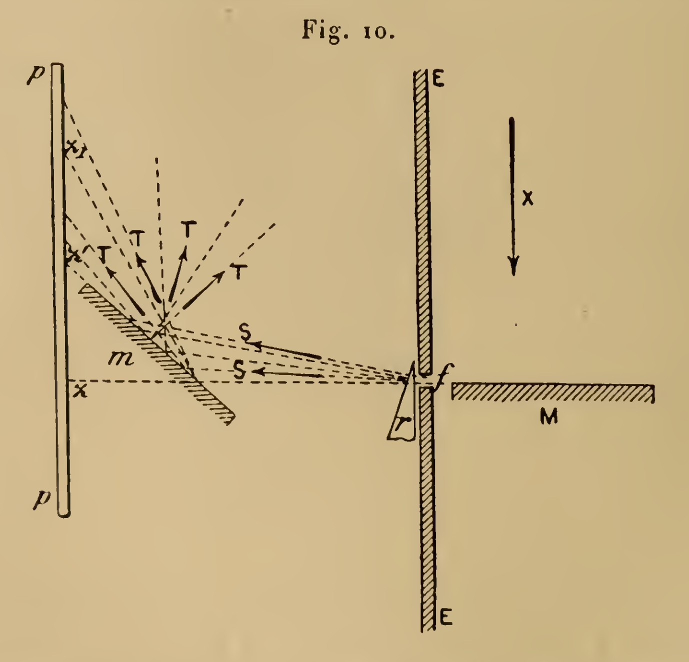


miroir M (*fig.* 9), un pinceau de rayons X issu d'une lame focus *l*, limité par une fente *f* percée dans un écran de plomb EE, puis par le bord inférieur d'un second écran de plomb *ee* voisin de la surface du miroir M. Une plaque photographique *pp*, soit nue (dans l'obscurité, le tube focus étant entouré de papier noir), soit enveloppée de papier noir ou encore enfermée dans un châssis de bois, n'enregistre *pas de faisceau réfléchi,* même si la surface M

est formée par un bain de mercure bien immobile et pour des incidences allant jusqu'à 75 degrés. Mais, de la région du miroir M frappée par les rayons X partent en tous sens des rayons secondaires S qui projettent en t' la silhouette d'une tige opaque t (aiguille d'acier disposée parallèlement aux bords des écrans E et e), comme le ferait une source lumineuse de mêmes dimensions et de même position que la zone du miroir M frappée par les rayons X. Ces rayons S sont émis jusque dans le plan du miroir M, où ils forment une *nappe plane de rayons* S; l'impression de la plaque photographique *pp* est limitée vers le bas à une ligne droite z, intersection du plan de la couche sensible et de la *nappe limite des rayons* S.

Cette dernière particularité se constate en un temps de

Fig. 10.



pose beaucoup plus court (une minute, par exemple, pour des distances de quelques centimètres), si les rayons X frappent la plus grande partie de la surface d'un miroir métallique M bien plan (*fig.* 10), un miroir d'acier, par exemple. La ligne z, qui limite vers le bas l'impression de la plaque sensible *pp*, est une ligne droite et reste *droite*

quelle que soit l'orientation du plan *pp* de la couche sensible, ce qui démontre que la nappe limite de rayons S est *plane*. Enfin cette ligne droite *z* est située dans le plan du miroir; je m'en suis assuré, en particulier, en employant un miroir M dont le contour était circulaire et venait toucher, par le bord de sa surface, la plaque sensible. Je projetais sur la plaque sensible, avec un autre faisceau de rayons X, une silhouette, pas trop intense, du miroir circulaire, en même temps que la surface du miroir envoyait des rayons secondaires; après développement, je voyais la limite *z* des rayons secondaires sous forme d'une droite tangente à l'ellipse qui formait le bord de la silhouette du miroir projetée par les rayons X. Il y a donc bien une nappe plane de rayons rectilignes S envoyés suivant le plan du miroir.

Un prisme *r* de verre, de paraffine (*fig.* 10), recevant près de son arête, à travers la fente *f* de l'écran de plomb EE, la nappe plane limite des rayons S, la laisse passer *sans réfraction*, mais affaiblit l'action radiographique des rayons S. Il suffit, pour le constater, de disposer une cloison opaque perpendiculaire à la fente *f* au milieu de sa longueur, de manière à diviser la nappe plane limite en deux moitiés : l'une, antérieure, traverse le prisme *r*; l'autre, postérieure, passe librement ou bien traverse un second prisme identique qui couvre la moitié postérieure de la fente, mais dont l'arête est tournée vers le bas. S'il y a réfraction des rayons S, la ligne droite *z* doit être déviée vers le bas sur la moitié antérieure de la plaque *pp*; sur la moitié postérieure, elle reste fixe ou bien, dans le cas de la réfraction à travers un second prisme inverse, est déviée vers le haut. Je n'ai pas observé de *dislocation* de la ligne *z* d'une moitié de plaque à l'autre; les deux moitiés de cette ligne droite demeurent, malgré les prismes, dans le prolongement l'une de l'autre (1).

(1) Ces expériences établissent que la réfraction des rayons S *utilisés*

Un second miroir m, placé sur le trajet des rayons S (*fig.* 10), avec ou sans le prisme r, arrête les rayons S sans les réfléchir. S'il y avait réflexion régulière des rayons S, la nappe plane de rayons S, envoyée suivant la tranche du miroir M, formerait, après réflexion sur m, une nouvelle nappe plane qui limiterait, cette fois *vers le haut*, à une droite z_1 l'impression de la couche sensible pp. Or l'impression s'étend sur pp, aussi bien au-dessus de z_1 qu'au-dessous; mais, vers le bas, l'impression s'arrête à une ligne droite z' située dans le plan de la surface m; le miroir m a émis à son tour en tous sens et jusque dans son plan des *rayons tertiaires* T se propageant aussi en ligne droite. Cette émission tertiaire trouble parfois les expériences de réfraction du dispositif de la *fig.* 10; la cloison, qui sépare les deux moitiés antérieure et postérieure de la fente f et reçoit des rayons secondaires, émet des rayons tertiaires qui peuvent voiler la plaque pp, particulièrement en regard de la tranche de la cloison, là où est plus courte la distance parcourue par les rayons tertiaires. On affaiblit cette perturbation en formant la cloison séparatrice d'une lame d'un corps comme le verre léger, l'ébonite, qui arrête suffisamment les rayons secondaires sans émettre beaucoup de rayons tertiaires. Il convient, pour la même raison, de recouvrir d'aluminium ou d'ébonite les bords de plomb des écrans qui limitent les rayons X ou les rayons secondaires dans les diverses expériences.

Les trois modes d'action (radioscopique, électrique et

---

ne porte pas sur la troisième décimale. Il ne me paraît pas douteux que, si l'on augmentait la distance parcourue *dans l'air* par les rayons S, on pourrait prouver que la réfraction des rayons S, *transmis par quelques mètres d'air*, porte tout au plus sur la sixième décimale, comme M. Gouy l'a établi pour les rayons X. Les rayons S forment, en effet, un faisceau très hétérogène, et ceux qui diffèrent le plus des rayons X générateurs sont justement arrêtés par l'air (*Cf.* Chap. II, § 5, 6, 7 et 8). Inversement, des expériences de réfraction, faites *dans le vide* de manière à respecter les rayons très absorbables par l'air, ne seraient pas nécessairement vouées à l'insuccès.

radiographique) signalés pour les rayons secondaires, le fait que ces actions s'exercent encore à travers des corps tels que le papier noir, l'aluminium, opaques aux rayons lumineux connus, la propagation rectiligne des rayons secondaires sans réfraction ni réflexion régulière, les rapprochent des rayons X dont ils dérivent. Mais nous allons voir qu'ils sont souvent fort différents des rayons X générateurs, qu'ils en sont souvent une *transformation* très profonde.

3. *Principe de la méthode de recherche de la transformation.* — Un miroir de cuivre, de zinc, d'acier, de nickel, que frappent les rayons X, envoie sur un récepteur, placé par exemple à quelques centimètres de distance dans l'air, des rayons secondaires que les différents milieux absorbent nettement plus que le faisceau des rayons X incidents. On le constate en comparant, soit avec une plaque photographique, soit avec un électroscope, l'opacité d'une mince lame d'aluminium, d'abord pour les rayons secondaires, puis pour le faisceau de rayons X qui les produisait. Ce fait pourrait, en l'absence de toute autre considération, s'expliquer par l'*hétérogénéité* du faisceau de rayons X. On sait, en effet, que les rayons X transmis par une lame A d'aluminium, par exemple, sont plus pénétrants que l'ensemble des rayons X incidents, et l'on peut dire, en s'aidant de l'analogie optique, que le faisceau incident est un mélange de rayons X qui diffèrent les uns des autres par leurs *pouvoirs de pénétration :* la lame filtrante laisse passer les rayons les plus pénétrants en plus grande proportion que les autres. Il suffirait alors d'admettre qu'un miroir de fer, de zinc, par exemple, dissémine surtout les rayons X les moins pénétrants du faisceau incident; la dissémination serait un phénomène de *diffusion élective* sans transformation, c'est-à-dire analogue à la diffusion de la lumière par les divers pigments colorés.

Laissant pour le moment de côté la question de savoir si certains groupes de rayons du faisceau incident sont plus particulièrement actifs dans les phénomènes d'émission secondaire (¹), je vais montrer que ces phénomènes sont liés à une *transformation* des rayons de Röntgen. La méthode suivante permet de démontrer l'*existence* et le *sens de la transformation :*

Je place une lame A, assez transparente aux rayons X, par exemple une lame d'aluminium de $\frac{1}{10}$ ou de $\frac{1}{3}$ de millimètre d'épaisseur, sur le trajet du faisceau issu du tube focus; puis je la transporte sur le trajet des rayons secondaires excités par le même faisceau issu du tube focus dans les mêmes conditions, de manière que l'épaisseur d'aluminium traversée par les rayons secondaires soit sensiblement la même que l'épaisseur traversée dans l'expérience précédente par les rayons X. Dans les deux cas j'étudie l'effet produit *par les rayons secondaires* sur le même récepteur (plaque photographique, électroscope ou écran au platinocyanure de baryum), sans modifier autre chose que la position de la lame d'aluminium, située dans le premier cas *avant* le corps frappé par les rayons X et, dans le second cas, *après* ce corps. S'il y avait *diffusion pure* des rayons X sans changement de pouvoir de pénétration, il serait indifférent de filtrer les rayons X *avant ou après diffusion;* l'activité des rayons secondaires enregistrée par le même récepteur serait la même quand la lame A est placée sur le trajet des rayons X et quand elle est placée sur le trajet des rayons secondaires. C'est justement ce qui n'a pas lieu : *l'ordre des filtrations influe sur le résultat.*

4. *Premier aspect des phénomènes de transformation.* — J'ai constaté cette influence de l'ordre des filtrations

(¹) *Voir* pour cette question : Chap. II, § 3 et 7; Chap. III, § 1, 2 et 4, et Chap. IV, § 4.

d'abord par des expériences purement qualitatives [1] :

Une plaque sensible *pp* est disposée à peu près comme dans le dispositif de la *fig.* 10, de préférence à quelques millimètres seulement de la fente *f* pratiquée dans l'écran de plomb EE, qui laisse passer un faisceau de rayons secondaires S émis par un miroir M en acier, nickel, zinc, etc. Le prisme *r* et le miroir *m* de la *fig.* 10 sont supposés absents. En une minute, par exemple, la plaque sensible *pp* est nettement impressionnée par les rayons S du miroir M excités par un faisceau de rayons X qui, avant d'atteindre M, a traversé à peu près normalement une lame d'aluminium d'épaisseur de $\frac{1}{10}$ de millimètre. Dans une seconde expérience, la lame d'aluminium précédente est transportée contre la fente *f* de la *fig.* 10, de manière à couper à peu près normalement le faisceau de rayons S; les autres conditions restant les mêmes, une plaque photographique *pp* de la même douzaine que la première ne montre pas d'impression appréciable dans le même temps de pose, ou du moins est relativement très peu impressionnée; cependant la source des rayons X n'a pas sensiblement varié; j'ai d'ailleurs fait des expériences de comparaison directe en enregistrant côte à côte sur la même plaque les impressions produites *simultanément* par les rayons secondaires filtrés par la lame A d'aluminium couvrant la moitié antérieure de la fente *f*, et par les rayons secondaires de M transmis sans filtration par la moitié postérieure de *f*, mais provenant de rayons X filtrés par une lame identique à A; il y avait alors, entre la plaque sensible et l'écran EE, un diaphragme d'aluminium ou d'ébonite séparant les deux moitiés de la fente *f*, et, de l'autre côté de EE, un second diaphragme dans le même plan que le premier séparant les deux moitiés du miroir M qui émettent les deux faisceaux secondaires comparés. D'après ces expériences, les rayons S enregistrés par la

[1] Les mesures électriques relatives aux degrés de transformation des rayons X par des corps divers sont exposées au Chap. II, § 7.

plaque *pp* proviennent de la *transformation* de certains rayons X du faisceau reçu par le miroir M *en rayons moins pénétrants*, dont l'action radiographique est considérablement affaiblie par une feuille d'aluminium de $\frac{1}{10}$ de millimètre.

La même expérience réussit quand la plaque photographique *pp* est remplacée par un électroscope recevant les rayons S, comme celui de la *fig.* 8, à travers une mince feuille *aa* en aluminium battu. La vitesse de décharge de la feuille d'or de l'électroscope *se ralentit beaucoup* quand une lame d'aluminium A primitivement placée sur le trajet des rayons X au-dessus du miroir M est transportée contre la fenêtre *aa* de l'électroscope.

Dans les mêmes conditions, on peut constater, moins nettement toutefois, que la luminescence d'un écran au platinocyanure de baryum exposé en *pp* à l'action des rayons S est *plus faible*, quand la feuille A d'aluminium filtre les rayons S, que si elle filtre les rayons X. On peut employer le même dispositif (*fig.* 10) que pour l'action radiographique.

Ces expériences qualitatives démontrent que les actions des rayons secondaires, l'action radiographique, l'action électrique et l'action radioscopique, sont dues à des rayons moins pénétrants que les rayons X générateurs : ceux-ci ont subi une transformation. On constate très nettement cette transformation pour des métaux lourds comme le plomb, le mercure, le platine, le nickel, le fer, le zinc, le cuivre ou les mélanges et combinaisons qui en renferment; mais la transformation paraît insensible pour des mélanges et combinaisons renfermant seulement du carbone, de l'oxygène, de l'azote, de l'hydrogène, ..., la paraffine, par exemple. Les rayons secondaires des corps qui transforment les rayons X nettement sont naturellement plus absorbables par les divers milieux que les rayons secondaires de corps tels que la paraffine. J'ai déjà dit qu'ils sont plus actifs (§ I, p. 45). Ces deux propriétés ne sont évidem-

ment pas indépendantes. Les rayons secondaires émis par un corps, même par un élément chimique, ne sont pas invariables; leur pouvoir de pénétration se modifie avec celui des rayons X générateurs; en tenant compte de l'influence perturbatrice due à l'absorption et à la filtration des rayons secondaires par l'air atmosphérique, j'ai constaté dans plusieurs expériences que les rayons secondaires d'un même métal devenaient plus absorbables en même temps que les rayons X dont ils provenaient.

5. *Rayons tertiaires. Transformation des rayons secondaires.* — A l'observation précédente se rattache le fait suivant : une mince lame d'aluminium qui absorbe et dissémine peu les rayons X absorbe et dissémine énergiquement les rayons secondaires très transformés émis par un miroir d'acier, par exemple (1).

Cette émission tertiaire se constate photographiquement en quelques minutes de pose, par exemple, à l'aide du dispositif représenté par la *fig.* 11.

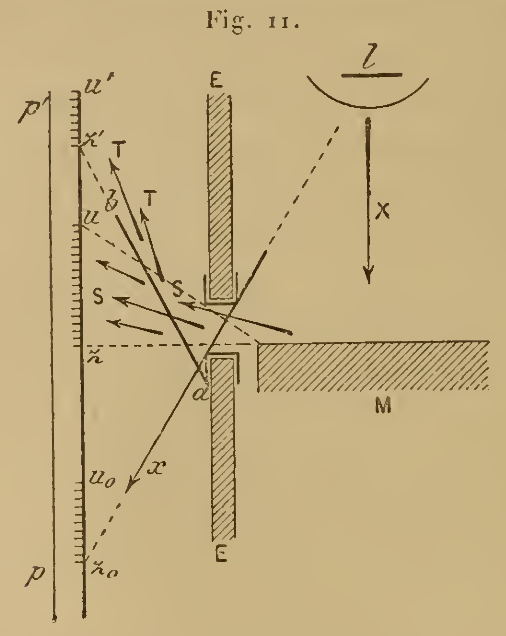
La fente de l'écran de plomb (2) EE laisse passer un pinceau de rayons X, issu de la lame focus l, qui vient impressionner en $u_0 z_0$ une plaque photographique pp' dont la couche sensible, soit nue, soit recouverte de papier noir, est tournée vers EE et séparée de EE par quelques millimètres seulement. Les rayons secondaires S issus d'un miroir plan M (d'acier, de platine, de plomb ou de toute autre lame plane formée d'un métal lourd ou renfermant un métal lourd) que frappent les rayons X de la lame focus l, traversent la fente de l'écran EE et viennent impressionner la plaque pp' sur la zone uz, limitée à la

(1) Je ne donne pas cette propriété comme un caractère spécifique de l'aluminium parfaitement *pur* (*voir* Chap. III, § 1). Mais il n'en différencie pas moins les rayons secondaires très absorbables et les rayons X dont ils sont la *transformation*.

(2) Les lèvres de la fente sont recouvertes d'ébonite, ce qui atténue beaucoup l'émission tertiaire par les lèvres de plomb.

droite z qui est dans le plan du miroir M. Une lame d'aluminium ab de $\frac{1}{10}$ de millimètre intercepte à peu près complètement les rayons secondaires S qui traversent la

Fig. 11.



moitié antérieure de la fente de l'écran EE; mais elle les transforme en rayons tertiaires T, qui impressionnent la plaque pp' sur une zone $u'z'$ située à 1^{mm} ou 2^{mm} seulement du bord b de l'aluminium [1] et limitée vers le bas à une droite z' dans le plan de ab. Après développement, le même cliché montre simultanément : 1° l'impression $u_0 z_0$ due aux rayons X; 2° l'impression uz due aux rayons S du miroir M; 3° l'impression $u'z'$ due aux rayons T émis par l'aluminium ab. L'expérience est réalisée de manière que le pinceau de rayons X directs n'agisse pas en $u_0 z_0$ notablement plus que les rayons S en uz, ni que les rayons T en $u'z'$. Cependant l'ombre de la lame d'aluminium ab donnée par les rayons X se détache très mal sur la zone $u_0 z_0$, tandis que l'ombre donnée par les

[1] Cette réduction de la distance a l'intérêt de diminuer l'importance de l'absorption par l'air des rayons tertiaires issus de ab et leur affaiblissement en vertu de l'influence géométrique de la distance.

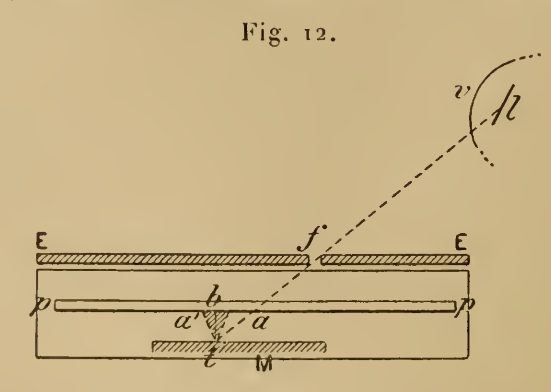
rayons S est extrêmement accusée; autrement dit, l'impression produite en uz par les rayons S qui ont traversé la lame ab est très faible à côté de l'impression due aux rayons S, qui ont traversé librement la moitié postérieure de la fente; les rayons secondaires sont beaucoup moins pénétrants que les rayons X. Enfin l'impression tertiaire $u'z'$ s'arrête nettement en z' dans le plan de ab, et les rayons T ne traversent pas sensiblement la lame ab même lorsque, dans la même expérience suffisamment prolongée, cette lame d'aluminium est encore traversée nettement par les rayons S; et cependant l'impression tertiaire en $u'z'$ est aussi intense que l'impression secondaire en uz. On voit ainsi que le pouvoir de pénétration des rayons va en diminuant par degrés quand on passe des rayons X aux rayons secondaires S, puis aux rayons tertiaires T, qui dérivent successivement les uns des autres.

Si le miroir M est supprimé et que le même tube focus, convenablement déplacé, envoie directement ses rayons X sur la lame d'aluminium ab, les rayons secondaires issus de la lame ab d'aluminium impressionnent à peine la plaque sensible pp', à moins que le temps de pose ne soit beaucoup plus long que dans l'expérience de production des rayons tertiaires. C'est dire que la lame d'aluminiun dissémine des rayons peu actifs quand elle est frappée par un faisceau de rayons X, tandis qu'elle dissémine des rayons relativement très actifs quand elle est frappée par une petite partie seulement des rayons S provenant de la transformation du même faisceau de rayons X. Cette expérience de comparaison de la dissémination des rayons X et des rayons secondaires montre l'importance de la nature des rayons incidents : une même substance envoie, en général, des rayons d'autant plus absorbables et, toutes choses égales d'ailleurs, plus actifs, que le faisceau des rayons incidents est lui-même plus absorbable. Cette remarque se trouve vraie, que l'on passe d'un faisceau de

rayons X soit à un faisceau de rayons secondaires dérivant de la transformation du précédent par un métal lourd, soit à un faisceau de rayons X plus absorbable que le premier, comme cela arrive, en général, quand, en augmentant la pression de l'atmosphère raréfiée d'un tube *dur* (¹) fonctionnant seulement pour une assez grande différence de potentiel établie entre ses pôles, équivalent par exemple à 20^{cm} d'étincelle, on passe à un tube *mou* (¹) fonctionnant pour une différence de potentiel beaucoup plus faible, équivalent par exemple à 1^{cm} d'étincelle. A ce point de vue les rayons secondaires très absorbables émis par les corps lourds rappellent les rayons X assez peu pénétrants des *tubes mous*.

Des résultats du même genre sont fournis sous une autre forme par le dispositif des *fig.* 12 et 13. Un pinceau *lf* de rayons X, défini par la lame focus *l* et par la fente *f* de l'écran de plomb EE, traverse le couvercle d'une boîte de

Fig. 12.



carton ou de papier noir, puis, à l'intérieur de cette boîte, une plaque photographique (ou une pellicule) *pp* sous une incidence de 45°, par exemple; ces rayons X impressionnent en *a* la couche sensible tournée en dessous et *nue* de ce côté, puis vont frapper en *t* des miroirs métalliques de cuivre, zinc, acier, ..., M (*fig.* 12) situés à quelques mil-

(¹) Les dénominations de tube *dur* (*hart*) et tube *mou* (*weich*) sont dues à Röntgen [troisième Mémoire (*Wied. Annalen d. Physik*, t. LXIV, p. 27; 1898)].

limètres au-dessous de la couche sensible. Chaque miroir rayonne autour de la zone étroite t, suivant laquelle il est frappé par les rayons X. Au-dessus des miroirs, la couche sensible est impressionnée suivant de petites taches b allongées parallèlement à la fente f perpendiculaire au plan de la *fig.* 12, parallèles en b, b' au plan de la *fig.* 13, d'autant plus étroites que le temps de pose est plus court (¹). Ces zones b, b' sont centrées sur la normale tb au miroir, et non pas sur la ligne, projetée en a', que définirait la direction de réflexion régulière; cela montre, encore une fois, que *l'émission secondaire n'est pas une réflexion régulière;* ici, elle est simplement privilégiée suivant le chemin le plus court, et *il ne faut pas confondre la zone impressionnée b avec la trace d'un faisceau réfléchi* (²). On obtient aussi une zone impressionnée b d'aspect analogue et de même position en remplaçant le miroir de métal lourd M par une lame de spath fluor qui envoie dans tous les sens les rayons ultra-violets étudiés par Winkelmann et Straubel; seulement, dans le même temps de pose, l'action photographique des rayons lumineux invisibles du spath fluor est beaucoup plus grande que celle des rayons S de l'acier, par exemple (³).

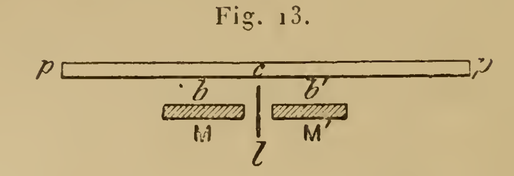
(¹) La zone b (*fig.* 12) est entièrement distincte de la zone a impressionnée directement par les rayons X; le temps de pose est suffisamment réduit pour cela, une minute par exemple. La paroi de verre v du tube focus émet aussi des rayons X; mais ces rayons impressionnent pp à droite de a seulement et ne peuvent ainsi empiéter sur b; leur action en chaque point est, d'ailleurs, plus faible que celle des rayons X et généralement comparable à celle des rayons S en b.

(²) De même, si toute la surface du miroir M est frappée par les rayons X, on obtient sur la plaque sensible une impression limitée à un contour plus ou moins net, qui est et demeure sensiblement la projection des bords du miroir M sur la plaque sensible, quelle que soit l'incidence des rayons X. Il ne faut pas confondre ces sortes d'images à bords diffus avec des images réfléchies.

(³) Ce serait justement l'inverse si l'on comparait les actions électriques. Ce qui achève de distinguer dans les expériences actuelles entre les rayons ultra-violets du spath fluor et les rayons secondaires, c'est

En même temps, les miroirs M et M′ envoient des rayons S sur la lame d'aluminium *l* (*fig.* 13) disposée de

Fig. 13.



manière à affleurer très près, à 1^{mm} par exemple, de la couche sensible *pp*; ils y produisent des rayons tertiaires qui viennent impressionner la couche sensible *pp* suivant une zone étroite *c* située au-dessus de la tranche de la lame *l*. Si le temps de pose n'est pas beaucoup exagéré, la zone *c* impressionnée par les rayons tertiaires de *l* est entièrement distincte des zones *b*, *b′* impressionnées par les rayons secondaires des miroirs M, M′. La zone *c* disparaît si l'expérience est faite après suppression des miroirs M, M′, même si l'on place la lame *l* presque perpendiculairement aux rayons X, à moins toutefois que l'on n'exagère beaucoup le temps de pose. L'intensité de l'impression sur cette zone *c* atteint et même dépasse celle qui est produite en *b* ou *b′* par les rayons secondaires, à condition que le bord supérieur de *l* soit suffisamment rapproché de la couche sensible de *pp*. Enfin cette zone étroite *c* court au-dessus de *l* perpendiculairement aux longueurs des zones *b*, *b′*, bien en dehors même de l'intervalle des zones d'action directe *b*, *b′* des rayons secondaires. C'est dire que *la lame d'aluminium* employée *décèle* par son émission tertiaire, dans l'espace compris entre les sources secon-

---

que les premiers se réfractent, traversent bien le spath fluor épais et sont arrêtés complètement par la plus mince feuille de papier noir ou d'aluminium battu. Enfin le spath fluor émet, lorsqu'il est réduit en poudre ou dépoli, que des rayons ultra-violets *beaucoup plus intenses* lorsqu'il est en lames à faces optiquement polies; au contraire, je n'ai pas observé de différence sensible entre le rayonnement secondaire d'un miroir d'acier M *très rugueux* et celui d'un miroir identique *optiquement poli* placé en M′ (*fig.* 13) à côté du premier.

daires M et M′, et même de part et d'autre de cet espace, *la présence des rayons secondaires qui, dans les conditions de l'expérience, passaient inaperçus dans cette région.*

6. *Comparaison des différents récepteurs.* — Les couches sensibles photographiques et les électroscopes donnent le plus souvent des résultats comparables dans l'étude des rayons X et de leurs transformations [1]. Ainsi les rayons secondaires des corps qui transforment beaucoup les rayons X (corps renfermant des métaux lourds, comme le plomb, le platine, l'étain, le nickel, le fer, le cuivre, etc.) sont beaucoup plus actifs sur une couche sensible ou un électroscope que ne le sont les rayons secondaires de l'aluminium, de l'ébonite, de la paraffine. Cette différence s'observe encore, mais bien moins grande, lorsque les rayons secondaires sont étudiés au moyen de la luminescence du platinocyanure de baryum. Soit une lame de fer, de zinc, dont le rayonnement secondaire excite la luminescence d'un écran au platinocyanure de baryum. Sur une moitié de l'écran luminescent respectée par les rayons secondaires précédents tombent les rayons secondaires émis dans les mêmes conditions géométriques par une lame d'aluminium, sous l'influence des rayons X émis par un second tube à vide sensiblement identique au premier. Il faut que ce second tube soit un peu moins éloigné de l'aluminium que le premier tube n'est éloigné de la lame de zinc, si l'on veut établir l'égalité d'éclat des deux plages luminescentes contiguës de l'écran au platinocyanure, qui fonctionne ainsi comme une sorte de photomètre. Si, sans déplacer les sources de rayons X, on remplace l'écran luminescent par une plaque photographique,

[1] A la condition toutefois que les conditions soient comparables; en particulier, il faut que les rayons secondaires aient traversé la même épaisseur d'air depuis leur source jusqu'à la couche sensible ou jusqu'à l'entrée de l'électroscope, puis que la couche sensible soit recouverte d'une feuille d'aluminium mince, comme celle qui ferme l'entrée de l'électroscope. On verra l'importance de ces précautions d'après les résultats indiqués au Chap. II, § 4, 5 et 6.

les deux moitiés de la plaque se montrent très inégalement impressionnées et les rayons secondaires du fer, du zinc se montrent plus actifs que ceux de l'aluminium. Une différence de même sens et aussi très nette s'observe si, dans les mêmes conditions, on remplace l'écran fluorescent par un électroscope dont la fenêtre d'entrée électriquement fermée par une feuille d'aluminium battu ou par une toile métallique reçoit successivement les rayons secondaires du fer et de l'aluminium. Ici la différence entre les rayons secondaires du zinc ou du fer et ceux de l'aluminium rappelle celle qui sépare, dans les mêmes conditions, les rayons X relativement absorbables d'un tube *mou* où le vide est peu poussé et les rayons relativement plus pénétrants d'un tube *dur* où la raréfaction de l'atmosphère gazeuse résiduelle est plus avancée. L'expérience de comparaison décrite est, en effet, analogue à une expérience dans laquelle Röntgen a comparé les actions d'un tube *mou* et d'un tube *dur* sur une plaque photographique, puis sur un écran au platinocyanure de baryum (¹). Des différences analogues s'observent entre les rayons secondaires divers produits par des corps différents sous l'influence du même faisceau de rayons X, par exemple entre les rayons secondaires émis par le platine à 1^{mm} dans l'air et les rayons secondaires émis par le cuivre, qui sont beaucoup plus pénétrants. La suite de ce travail contribuera à rendre compte des différences qui séparent les récepteurs radioscopiques des récepteurs radiographiques et électroscopiques actuellement employés (²).

La méthode radiographique et la méthode électrique ont ainsi l'avantage de permettre plus facilement la distinction entre les rayons secondaires inégalement pénétrants émis par des corps différents, dans les mêmes con-

---

(¹) Röntgen, Troisième Mémoire, *Wied. Ann. d. Physik*, t. LXIV, p. 34; 1898.

(²) *Voir* Chap. II, § 2 et 3; Chap. IV, fin du § 4.

ditions. Elles montrent aussi bien mieux la diminution de pouvoir de pénétration qui permet de reconnaître la transformation, je veux dire la diminution d'activité des rayons secondaires qui se produit si une lame A, placée d'abord sur le trajet des rayons X générateurs, est ensuite transportée sur le trajet des rayons secondaires. Aussi, dans l'étude qui va suivre, ai-je presque complètement laissé de côté la méthode radioscopique. La méthode radiographique est souvent précieuse pour les comparaisons simultanées et surtout lorsqu'il s'agit de constater un phénomène de *propagation*. Elle a l'inconvénient d'enregistrer en même temps que les rayons secondaires les rayons lumineux visibles ou ultra-violets qui accompagnent accidentellement les rayons secondaires, lorsque le corps frappé par les rayons X est *radioluminescent*, à moins que la couche sensible ne soit recouverte d'une feuille d'aluminium ou de papier noir; mais cette feuille arrête beaucoup les rayons secondaires très peu pénétrants émis par les métaux lourds. Dans le cas où le corps employé est un métal, pur de toute oxydation superficielle, il n'y a pas de raison pour admettre une radioluminescence accidentelle, et il faut penser que l'impression de la couche sensible *nue* est alors uniquement due à des rayons secondaires; l'inconvénient signalé ne semble plus exister. L'emploi d'un métal pur de toute oxydation superficielle présente le même avantage lorsqu'on étudie les rayons secondaires électriquement; mais il n'est plus alors aussi nécessaire : l'action électrique des rayons lumineux émis accidentellement est, en effet, très souvent négligeable par rapport à celle des rayons secondaires; par exemple, si l'on saupoudre de sulfure de zinc, de platinocyanure, etc., une lame métallique électrisée et qu'on y fasse tomber des rayons X, l'influence de la nature de la surface dans la décharge de cette lame, telle qu'elle sera définie plus loin [1], est due

[1] *Voir* Chap. III, § 4.

uniquement aux rayons secondaires, car elle s'affaiblit rapidement si l'on recouvre la surface de la lame métallique d'une lame transparente aux rayons lumineux émis par la poudre luminescente, et tend sensiblement vers zéro quand l'épaisseur de la lame transparente augmente, bien que les rayons de radioluminescence ne soient pas interceptés. Dans les mêmes conditions, au contraire, l'impression radiographique due aux rayons X et secondaires serait troublée par celle des rayons de radioluminescence, le plus souvent augmentée, parfois *diminuée* cependant ([1]). D'autre part, la méthode électrique permet d'observer immédiatement avec précision des effets que la méthode radiographique enregistre seulement après un temps de pose quelquefois assez long; la rapidité avec laquelle se font les observations électriques, une demi-minute, par exemple, permet d'effectuer une série de mesures sans que la nature de l'intensité des rayons X soit modifiée, et l'on s'assure facilement qu'il en est ainsi en *croisant* régulièrement ces observations de courte durée.

CHAPITRE II.

ÉTUDE DES DIVERS RAYONS SECONDAIRES.

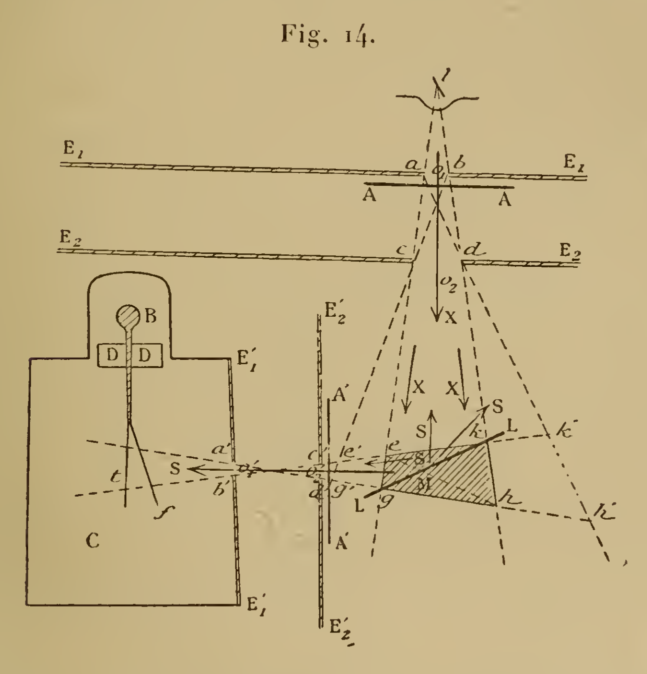
1. Méthode d'étude électrique. — 2. Influence de l'épaisseur. Émissions secondaires antérieure, postérieure et latérale. — 3. Influence de la nature des rayons X incidents sur les résultats de la comparaison de divers corps. — 4. Influence des épaisseurs d'air ou de divers milieux traversées par les rayons secondaires entre le corps rayonnant et l'électroscope. — 5. Absorption des rayons secondaires par l'air. — 6. Hétérogénéité des faisceaux de rayons secondaires. — 7. Étude électrique de la transformation. — 8. Résultats relatifs à des corps divers.

1. *Méthode d'étude électrique.* — Pour étudier les actions électriques des rayons secondaires émis par différents corps, j'ai employé le dispositif que représente schématiquement la *fig.* 14.

([1]) *Voir* Première Partie, § 6, p. 32, fin de la note.

L'électroscope C ne peut recevoir, à travers la feuille d'aluminium $a'b'$ placée sur l'ouverture o'_1 de la paroi $E'_1 E'_1$ en plomb suffisamment épais, que des rayons compris dans le cône $a'd'b'c'$ défini par l'ouverture o'_1 et par l'ouverture o'_2 des écrans de plomb E'_1 et E'_2. La lame focus l du

Fig. 14.



tube à vide n'envoie de rayons X que dans le cône $acbd$, défini par les ouvertures o_1, o_2 des écrans de plomb E_1 et E_2. L'électroscope C peut être déchargé seulement (¹) par les

(¹) Le verre du tube focus émet aussi des rayons X. Des rayons secondaires proviennent, d'autre part, des parois internes de la caisse de plomb dont $E_1 E_2$ est la paroi antérieure et qui renferme le tube focus, ou, d'une manière générale, de tous les corps placés derrière l'écran $E_1 E_1$. Mais tous les rayons qui sortent de l'ouverture ab sont limités, par l'écran $E_2 E_2$, à l'intérieur du cône $adbc$ et ne peuvent pas pénétrer par l'ouverture o'_2 de l'écran E'_2. Enfin les rayons supplémentaires dérivés des précédents sont excités seulement dans l'espace $ege'g'$, $khk'h'$ extérieur à M où ne se trouve que de l'air atmosphérique; ils sont négligeables; d'ailleurs les résultats des observations n'étaient pas sensiblement modifiés quand on plaçait, soit entre le tube focus et $E_1 E_1$, soit de l'autre côté de $E_2 E_2$, un nouvel écran de plomb dont l'ouverture respectait le faisceau lab, mais réduisait beaucoup le faisceau supplémentaire cee', dkk'.

rayons secondaires qu'excitent les rayons X dans l'espace M limité à *ekgh*, qui est commun aux cônes précédemment définis. C'est dans cet espace qu'est disposé le corps dont il s'agit d'étudier l'émission secondaire.

Lorsque l'*air atmosphérique* est la seule matière qui remplisse l'espace M, la feuille d'or *f*, bien isolée ([1]) par un support de diélectrine Hurmuzescu DD, présente déjà une légère vitesse de décharge dès qu'on excite le tube à rayons X. L'effet disparaît si l'on dispose sur l'une des fenêtres o_1, o_2, o'_1 ou o'_2, une lame métallique de plomb suffisamment épais. Il est dû à l'*action électrique des rayons secondaires émis par l'air* de l'espace M sous l'influence des rayons X qui le traversent. L'effet est d'ailleurs extrêmement faible par rapport à celui que donnerait directement le faisceau de rayons X, surtout quand le tube focus n'est pas un peu mou et n'émet que des rayons X assez pénétrants. Avec des tubes focus *mous*, j'ai observé très nettement l'émission secondaire de l'air dans divers azimuts, en particulier à angle droit de la direction des rayons X incidents; la décharge de l'électroscope pouvait être observée, même quand le volume M d'air atmosphérique rayonnant était réduit à un décimètre cube, par exemple ([2]).

([1]) L'isolement était assez bon pour qu'il fût généralement inutile de tenir compte de la déperdition spontanée de l'électricité.

([2]) Röntgen a annoncé le premier la dissémination des rayons X par l'air (3e Mémoire, *loc. cit.*); il l'a observée au moyen de l'écran au platinocyanure de baryum et s'est assuré que la luminescence de l'écran disparaissait quand l'air était suffisamment raréfié. J'ai étudié la dissémination par l'air bien avant la publication du 3e Mémoire de Röntgen, en décembre 1896, en employant la méthode radiographique. En présence de la faiblesse des effets que j'ai observés ainsi, j'ai été conduit à approfondir tout d'abord l'action rayonnante des corps solides et particulièrement des métaux lourds, que j'avais reconnue *beaucoup plus importante*. Aussi, lorsque je suis revenu à l'étude du rayonnement secondaire de l'air, ai-je eu soin que les rayons secondaires émis par les bords *a*, *b*, *c*, *d* des écrans de *plomb* limitant les rayons X ne pussent pénétrer directement dans l'électroscope par

Les expériences précédentes, comme les suivantes, se font en observant, dans un viseur à court foyer non représenté sur la *fig.* 14, le déplacement de la feuille d'or *f*. L'électroscope est du type Exner, c'est-à-dire ne possède qu'une seule feuille d'or *f* s'écartant plus ou moins d'une lame métallique verticale *t*. La feuille *f*, qu'il est loisible de constituer par une feuille mince d'aluminium battu plus maniable que les feuilles d'or, est découpée avec un bord bien net sans bavures; sur un micromètre oculaire dont est muni le viseur, on voit au point l'image de ce bord bien net de la feuille *f* visée presque par la tranche; il est facile d'en suivre le déplacement en prenant pour repères les extrémités, bien nettement accusées et bien en ligne droite, des traits du micromètre oculaire [1], La feuille *f* est bien protégée contre les mouvements de l'air par la cage C complètement fermée; la visée se fait à travers une ouverture vitrée qui sert en même temps pour éclairer convenablement la feuille *f*. Le reste de la paroi, à travers la fenêtre vitrée de laquelle se fait la visée, et les autres parois sont en métal; il est quelquefois utile de les doubler de plomb épais pour supprimer toute action rayonnante due à des rayons X très pénétrants qui par-

l'ouverture o'_1; ces rayons secondaires pouvaient seulement se disséminer sur l'air atmosphérique et sur le bord *d'* de l'écran E'_2; mais les rayons tertiaires ainsi produits étaient négligeables dans mon dispositif, grâce à la distance parcourue dans l'air par les rayons secondaires entre E_1, E_2 et l'espace limité au cône *a'd'b'c'*, dans lequel prennent naissance tous les rayons susceptibles d'entrer dans l'électroscope; je m'en suis assuré, en particulier, ainsi : l'effet n'augmentait pas sensiblement si des fils de plomb étaient tendus en travers des fenêtres *ab*, *cd* et exposés ainsi aux rayons X, bien que l'étendue des bords de plomb fût ainsi beaucoup augmentée.

[1] J'ai quelquefois employé, au lieu d'un micromètre oculaire, une échelle divisée placée en arrière de la feuille *f*; il était alors nécessaire de ne pas trop grossir le déplacement de la feuille d'or, afin de voir simultanément au point la feuille d'or et les divisions du micromètre. En particulier, l'émission secondaire par l'air est plus difficile à voir avec ce dispositif qu'avec celui du micromètre oculaire.

viendraient à traverser en petite quantité les écrans de plomb E_1, E_2. La cage métallique de l'électroscope est soigneusement reliée au sol. Cette précaution est particulièrement nécessaire si la bobine de Ruhmkorff qui actionne le tube à rayons X n'est pas enfermée, avec le tube focus, dans une caisse métallique reliée au sol. Dans le cas où les oscillations électriques du système bobine-tube sont intenses, les communications avec le sol doivent être particulièrement soignées et faites avec les conduites de gaz au moyen d'un conducteur de section suffisante. Avec ces précautions, la feuille *f* reste immobile tant que la bobine de Ruhmkorff fonctionne seule ou que, le tube focus fonctionnant aussi, on arrête les rayons X ou les rayons secondaires par un écran de plomb. D'autre part, grâce à l'emploi d'une seule feuille *f*, qui s'écarte plus ou moins de la lame métallique fixe *t*, le zéro de l'appareil est bien fixe et le bord rectiligne de la feuille *f* revient toujours, dans les mêmes conditions, passer par le même repère du micromètre oculaire. D'une série d'expériences à une autre, je change parfois l'objectif du viseur suivant qu'il convient de grossir plus ou moins le déplacement de la feuille d'or, c'est-à-dire suivant l'intensité de l'action électrique des rayons étudiés. Dans chaque série d'observations, il convient de régler l'intensité des rayons X ou des rayons secondaires, de manière que la feuille *f* prenne une vitesse modérée telle que, si l'on arrête brusquement l'émission des rayons X en rompant le courant primaire de la bobine de Ruhmkorff, la feuille *f* s'arrête sensiblement aussitôt (¹).

Dans ces conditions, l'activité électrique des rayons

(¹) La possibilité de réaliser la condition précédente montre que, dans mes expériences, l'émission des rayons X étant interrompue, l'émission des rayons secondaires cesse sensiblement aussitôt, à un dixième de seconde près environ. On pourrait rechercher avec plus de précision, au moyen d'un dispositif analogue au *phosphoroscope* d'Ed. Becquerel, si l'émission secondaire est instantanée ou dure un certain

secondaires émis par un corps donné se mesure, à l'aide d'un chronomètre, par l'inverse du temps nécessaire pour faire passer, sans vitesse acquise, le bord visé de f d'une division n_1 à une autre division n_2 du micromètre oculaire. Les durées de décharge ainsi obtenues varient généralement de dix secondes à moins d'une minute. Dans une série de comparaisons de rayons secondaires divers, la décharge est toujours observée entre les *mêmes limites* n_1 *et* n_2; les activités électriques des rayons secondaires se comparent par les inverses des temps t nécessaires pour la même décharge entre les mêmes limites ([1]). Le potentiel de la feuille f est généralement de quelques centaines de volts et n'est que fort peu réduit pendant la légère décharge observée. L'électroscope est de forme cubique et a 13^{cm} de côté.

Dans les expériences où il s'agit de comparer l'action électrique d'un faisceau secondaire à celle des rayons X qui le produisent, il est nécessaire de ramener l'action électrique des rayons X à être comparable à celle des rayons secondaires, afin que la feuille f se déplace, sans vitesse acquise, avec la lenteur qui convient à une bonne mesure; on réduit alors l'angle solide du faisceau de rayons X reçu par l'électroscope en employant une

---

temps après que l'excitation a cessé; sans ce dispositif on ne pourrait employer, dans ce but, la méthode radioscopique, car la luminescence d'un écran au platinocyanure de baryum frappé par les rayons X ou les rayons secondaires dure un certain temps, parfois même près d'une seconde, après que les rayons X ont été supprimés. La méthode radiographique s'adapterait bien à l'emploi d'un dispositif analogue au phosphoroscope. La méthode électrique pourrait aussi être employée.

([1]) C'est, *en principe*, la méthode que M. Righi employait pour mesurer les activités électriques des rayons ultra-violets (*Atti d. R. Accad. di Bologna*, 1888 à 1891) et que MM. Benoist et D. Hurmuzescu, après avoir les premiers, en France, découvert les phénomènes de décharge par les rayons X, ont employée pour étudier comment les actions électriques de ces rayons varient avec la distance, avec la nature du métal qu'ils frappent et la pression du gaz adjacent au conducteur (*Comptes rendus*, t. CXXII, p. 235, 379, 779, 926; 1896).

ouverture ab ou $a'b'$ notablement plus petite. D'une manière générale, on s'efforce de ne comparer directement que des actions électriques dont le rapport ne dépasse pas beaucoup 3 ou 4 environ, ou soit moins élevé autant que possible; lorsque, cependant, l'une des actions comparées est par trop lente, il faut réduire l'intervalle $n_1 n_2$ du déplacement de la feuille f à une nouvelle valeur $n'_1 n'_2$ plus faible, de manière à réduire la durée de l'action lente à trente secondes par exemple; mais comme l'action plus rapide, à comparer avec la précédente, s'effectuerait, entre n'_1 et n'_2, en un temps trop court pour être mesurée avec la précision voulue, on réduit cette action rapide en diminuant l'ouverture o'_2 de l'électroscope. Dans ce cas, comme dans d'autres expériences qui seront signalées, il y a intérêt, pour rendre les mesures comparables, à ce que la lame t qui porte la feuille d'aluminium f soit assez étendue pour recevoir, dans toutes les expériences, la totalité du faisceau de rayons admis par l'ouverture o'_1; dans certains cas, il est nécessaire, en outre, que la feuille f soit située du côté de la lame t opposé à o'_1, à l'inverse de ce que montre la *fig*. 14. La lame t est alors suffisamment étendue vers le bas et forme l'armature plane électrisée d'un *condensateur* dont l'autre armature, formée par la paroi plane $E'_1 E'_1$, est au sol. Tandis que l'armature au sol est transparente aux rayons sur l'étendue ab de la feuille d'aluminium battu qui recouvre intérieurement les bords de o'_1, l'armature t est choisie assez opaque pour arrêter sensiblement tous les rayons incidents; le phénomène de la décharge est alors localisé dans le condensateur à armatures planes t, $a'b'$, dont le champ électrique est sensiblement indépendant de la hauteur dans la partie utile traversée par les rayons.

Lorsque l'on effectue des comparaisons d'activités électriques sans employer de précautions pour produire l'émission des rayons X, la répétition des mesures montre que

les nombres obtenus pour durées de décharge ne sont pas fixes. Il est tout à fait indispensable de choisir spécialement le tube focus; il convient qu'il ait déjà fonctionné quelque temps sous le régime d'excitation électrique que l'on a choisi pour effectuer les mesures, et ce régime doit être assez modéré pour ne pas altérer l'état de vide intérieur du tube pendant la série des comparaisons à effectuer (1). D'autre part, et ceci est plus délicat, il faut que l'interrupteur de la bobine de Ruhmkorff soit suffisamment régulier. Cela est difficile avec l'interrupteur Foucault. J'ai employé dans mes premières recherches l'interrupteur Deprez; j'ai obtenu souvent une excellente régularité des interruptions, qui se produisaient alors avec un son musical assez pur. J'ai reconnu qu'il faut pour cela avoir un interrupteur dont l'ensemble (colonne métallique fixée sur le socle de la bobine et vibrateur porté par cette colonne, avec une vis pressant plus ou moins sur le ressort élastique du vibrateur) ne soit ni trop rigide, ni trop lâche; cette remarque concorde avec celle qu'a publiée M. Izarn, dont j'ai aussi employé avec succès le dispositif (2); celui-ci consiste à souder la colonne portant le vibrateur à une lame de laiton maintenue sur le socle de la bobine par 3 ou 4 vis dont on règle convenablement le

(1) Il importe pour cela que le tube n'ait pas fonctionné à l'envers pendant un temps notable; si, par mégarde, la cathode est placée à la lame focus, le platine de cette lame subit l'évaporation électrique signalée par Crookes et vient former sur les parois un dépôt qui *absorbe assez vite les gaz* et rend le tube assez vite plus *dur* et surtout *irrégulier*. Il convient, d'autre part, que le tube ait été préparé sous un régime électrique supérieur à celui que l'on choisit pour faire les mesures, sans quoi *il se dégagerait des gaz de la lame focus* pendant la série des mesures, comme il arrive pendant la préparation du tube, qui deviendrait ainsi de plus en plus *mou*. Je me suis servi presque toujours des tubes focus que M. V. Chabaud construit avec beaucoup de soin.

(2) Izarn, *Journal de Physique*, t. VII, p. 342; 1898.

serrage. Dès l'apparition de l'interrupteur de Wehnelt [1], je l'ai employé presque constamment : il permet, quand il est bien réglé, d'avoir un rayonnement bien constant et cependant aussi intense que le comporte le degré de stabilité du tube focus; ces avantages sont particulièrement précieux, lorsqu'il s'agit d'étudier des rayons secondaires peu actifs. Au commencement d'une série de mesures, il convient de faire quelques mesures préparatoires jusqu'au moment où le système producteur de rayons X a pris un régime permanent et où les observations sont bien concordantes. Les mesures définitives sont ensuite faites à intervalles réguliers, sans que le système producteur de rayons X fonctionne en dehors du temps des mesures. Avant chaque observation, le chapeau de l'électroscope est enlevé et le bouton B chargé au moyen d'un petit électrophore ou d'un simple bâton de résine ou de verre; je n'ai guère eu besoin de me servir d'une batterie d'accumulateurs pour avoir toujours le même potentiel initial; avec un peu d'habitude, il est facile de charger l'électroscope de manière que la feuille f dévie légèrement plus qu'il ne convient; on ramène alors le bord visé de la feuille f à passer par la division n_1 du micromètre, en fermant, pendant le temps assez court qui convient, le circuit primaire de la bobine de manière à produire la légère décharge nécessaire; le potentiel initial correspond ainsi, dans toutes les mesures d'une série, à la même déviation de la feuille f. Le chronomètre est lancé au moment précis

---

(1) A. Wehnelt, *Wied. Annalen d. Physik*, t. LXVIII, p. 233; 1899. Je signale aussi, bien que ne l'ayant pas utilisé, l'interrupteur de M. Max Lévy, de Berlin : c'est une sorte de foucault dans lequel le mercure est dirigé en un jet continu contre la paroi d'un cylindre découpé en lames verticales et animé d'une rapide rotation; les interruptions et rétablissements successifs du courant se produisent ainsi à l'aide de mercure dont la surface est maintenue très propre, par suite de son renouvellement continu; ce qui supprime le principal inconvénient du foucault.

où l'on ferme le circuit primaire; le bord de f quitte la division n_1; au moment où il arrive à la division n_2, je pousse le cran d'arrêt du chronomètre, puis j'interromps le circuit primaire de la bobine. En prenant les précautions signalées, j'ai obtenu presque constamment des durées de décharge concordantes à moins de $\frac{1}{50}$ près de leur valeur, et même mieux encore; les mesures croisées m'ont permis de m'assurer de cette concordance; j'ai rejeté tous les résultats dont la précision était notablement inférieure à $\frac{1}{50}$.

Si une lame épaisse de *paraffine*, de *soufre*, d'*ébonite*, d'*aluminium*, etc., est disposée en L (*fig.* 14) dans l'espace M primitivement occupé uniquement par l'air atmosphérique, la vitesse de décharge de la feuille f de l'électroscope est notablement plus grande que sous l'action des rayons secondaires issus de la masse d'air M, et d'ailleurs différente d'un corps à l'autre. Elle devient encore bien plus grande si la lame LL est formée d'un métal lourd comme le *cuivre*, le *zinc*, le *fer*, le *nickel*, l'*étain*, le *platine*, le *plomb*, etc., ou d'un corps renfermant de tels métaux soit à l'état de mélange, soit à l'état de combinaison. L'activité électrique des rayons secondaires de tels métaux est assez grande pour qu'il soit nécessaire de réduire la surface de la lame L à quelques centimètres carrés d'étendue, quand la distance de L à l'ouverture o'_1 de l'électroscope est voisine du décimètre. On peut alors rapprocher beaucoup la lame L de l'électroscope, ce qui est fort utile, comme la suite le montrera, pour se rendre compte de l'absorption des rayons secondaires par l'air; on diminue alors en conséquence les ouvertures o'_1 et o'_2 de manière que, dans toutes les expériences, l'écart angulaire des rayons secondaires extrêmes $a'd'$, $b'c'$ soit assez faible, comme d'ailleurs celui des rayons X extrêmes ac et bd. On peut alors, dans l'étude de la transmission des rayons au travers d'une

lame placée normalement à l'axe du cône de rayons, admettre que cette lame est traversée par les rayons sous l'incidence normale, et, en second lieu, que la même lame placée successivement en AA puis en A′A′ filtre sous la même épaisseur les rayons X, puis les rayons secondaires; ce dispositif sera particulièrement précieux dans l'étude de la *transformation* par l'influence de l'ordre des filtrations. Mais il convient de comparer d'abord les activités électriques de corps divers et de rechercher les circonstances dont peut dépendre le résultat de cette comparaison.

2. *Influence de l'épaisseur. Émissions secondaires antérieure, postérieure et latérale.* — L'action électrique des rayons secondaires de l'air, excités par un faisceau de rayons déterminé *lab* (*fig.* 14), augmente avec l'épaisseur du volume M d'air traversée par les rayons, et sensiblement en raison directe du volume M intéressé. De même, l'action électrique des rayons secondaires de la paraffine, par exemple, croît avec l'épaisseur de la lame de paraffine employée, mais de moins en moins vite, et tend pratiquement vers une valeur limite qu'elle ne dépasse plus quand l'épaisseur croît davantage; cette épaisseur est ordinairement de l'ordre du centimètre, elle augmente de plus en plus à mesure que l'on emploie des rayons X de plus en plus pénétrants et semble alors croître au delà de toute limite.

La masse tout entière du corps rayonne alors dans tous les sens, comme dans le cas de l'air, aussi bien par la face de sortie des rayons X, pour donner des rayons secondaires postérieurs, que par les faces latérales du bloc de paraffine employé, même si ces faces ne sont pas traversées par des rayons X, et il se produit alors des rayons *secondaires latéraux* [1]. Pour observer, par exemple, les

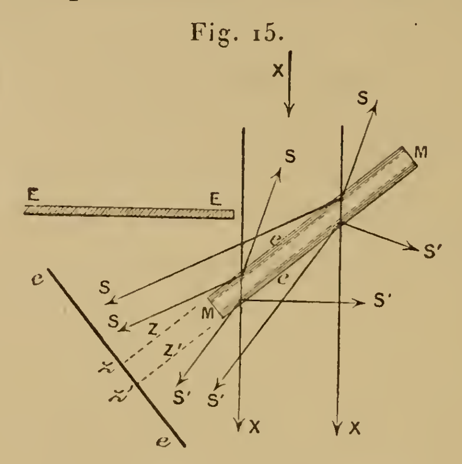
[1] Le professeur H. Dufour, de Lausanne, a réalisé de jolies expériences au sujet de l'émission secondaire latérale des corps assez trans-

rayons secondaires postérieurs d'un corps quelconque, il suffit, dans le dispositif de la *fig.* 14, de prendre la lame LL assez mince pour être traversée notablement par les rayons X et de la disposer non plus suivant *gk*, mais suivant *eh*, de manière à tourner la face de sortie des rayons X vers l'électroscope. On peut remplacer l'électroscope par une plaque photographique ou par un écran au platinocyanure de baryum, et la paraffine par une lame transparente d'un corps quelconque; l'épaisseur de la lame employée sera donc d'autant plus faible que le corps est plus opaque; on emploiera, par exemple, une lame de paraffine de quelques millimètres et, dans les mêmes conditions, une lame d'aluminium de quelques dixièmes de millimètre, une feuille d'or de quelques dixièmes de micron. Si la lame LL renferme un métal lourd qui transforme notablement les rayons X ou bien un des composés d'un tel métal, on n'affaiblit pas sensiblement l'émission des rayons secondaires antérieurs S et l'on augmente progressivement celle des rayons postérieurs S', si l'épaisseur de la lame MM (schéma de la *fig.* 15), d'abord peu inférieure à l'épaisseur *a* qui arrêterait sensiblement le faisceau de rayons X, est diminuée progressivement jusqu'à une certaine épaisseur *e* très inférieure à *a*; mais si l'épaisseur de la lame MM descend au-dessous de *e*, l'émission des rayons S, et bientôt celle des rayons S', s'affaiblit, d'abord lentement, puis très vite. C'est dire que chaque élément de matière atteint par les rayons X émet un rayonnement secondaire qui ne traverse pas sensiblement une épaisseur

parents, comme le bois, la paraffine, les huiles, en employant comme récepteur une plaque photographique (*Archives des Sciences phys. et nat. de Genève*, 4e série, t. VIII, p. 370 et 529; 1899). On pourrait certainement étendre ces expériences à des corps comme l'aluminium et même comme le fer, à condition d'employer des rayons X suffisamment pénétrants.

de matière supérieure (¹) à e. Si l'épaisseur de la lame LL ne dépasse pas e, chaque élément de matière rayonne à la fois à travers chaque face de la lame. Pour une épaisseur

Fig. 15.



supérieure à e, il y a une couche de matière d'épaisseur e, attenant à la face d'entrée des rayons X, qui émet la plus grande partie des rayons secondaires antérieurs S et une couche analogue d'épaisseur comparable, attenant à la face de sortie, qui émet la plus grande partie des rayons postérieurs S'; les deux couches d'émission ont une partie commune si l'épaisseur de la lame MM est inférieure à $2e$, et sont sensiblement distinctes si cette épaisseur est supérieure à $2e$ (cas de la *fig.* 15).

Il suit de là que les rayons secondaires postérieurs S' sont excités par des rayons X qui sont plus pénétrants que ceux qui excitent les rayons secondaires antérieurs S, comme ayant traversé l'épaisseur du corps qui sépare la couche d'émission antérieure et la couche d'émission postérieure. Aussi les rayons secondaires postérieurs sont-ils plus pénétrants que les rayons secondaires antérieurs; à cette différence près, ils possèdent en général les mêmes

(¹) La signification de la grandeur e de la couche d'émission secondaire sera précisée plus loin : *voir* § 6 de ce Chapitre, *Hétérogénéité des rayons secondaires*.

propriétés; on peut dire que les propriétés des rayons secondaires postérieurs S′ sont, en général, celles des rayons secondaires antérieurs S produits par le même faisceau de rayons X, à condition de filtrer, au préalable, ce faisceau de rayons X à travers une lame d'épaisseur convenable de même substance que la lame MM étudiée; par exemple, l'épaisseur de leur couche d'émission dépasse, en général, la valeur de celle des rayons secondaires antérieurs, et la différence est d'autant plus grande que la lame MM est plus épaisse. Sauf indication expresse, les études qui vont suivre sont relatives aux rayons secondaires antérieurs [1].

On peut se demander si les résultats des observations ne sont pas troublés par l'émission secondaire de la masse d'air M (*fig.* 14). Cette influence n'est pas négligeable quand la lame LL disposée dans l'espace M est formée d'une substance comme la paraffine, l'aluminium, assez transparente aux rayons X et, par suite, aux rayons secondaires de l'air, qui sont assez peu différents des rayons X incidents. Par exemple, que l'on superpose en L (*fig.* 14) un nombre croissant de lames d'aluminium d'une fraction de millimètre d'épaisseur chacune; l'action électrique secondaire observée existe déjà en l'absence de la première lame d'aluminium; elle augmente avec l'épaisseur d'aluminium placée en L, d'abord très vite, puis plus lentement, passe par un maximum, puis diminue pour tendre vers une limite. J'ai trouvé, par exemple, que la lame L faisant environ 45° avec les rayons X et avec les rayons secondaires envoyés dans l'électroscope C, cette limite était atteinte sensiblement pour une épaisseur d'aluminium de 2^{mm} et l'action de décharge était alors envi-

---

[1] L'influence des rayons secondaires postérieurs dans l'étude des coefficients de transmission des rayons X est signalée plus loin (Chap. III, § 2 et 3), ainsi que leur rôle dans le mécanisme de la décharge des conducteurs *traversés* par les rayons X (*loc. cit.*, et § 4).

ron les $\frac{3}{4}$ de l'action maximum observée pour une épaisseur plus faible. Ces résultats s'expliquent suffisamment en admettant que les rayons secondaires de l'air du volume M (*fig.* 14) agissent en même temps que ceux de l'aluminium L; l'action de l'air du volume *egk*, situé en avant de la lame L, n'est pas altérée par l'augmentation d'épaisseur de cette lame; au contraire, les rayons secondaires du volume d'air *ghk*, situé derrière la lame L, sont affaiblis par la traversée de cette lame L et d'autant plus que cette lame est plus épaisse; on comprend que cette influence puisse faire diminuer l'action totale lorsque, les rayons secondaires de l'aluminium ayant atteint sensiblement leur maximum d'intensité, l'épaisseur de l'aluminium augmente encore. Cette explication est en accord avec le fait suivant : Si l'on fait tourner l'électroscope C et la lame L de manière que les rayons X tombent sur la lame L sous une incidence assez grande, 70° par exemple, et que les rayons secondaires soient envoyés suivant une émergence aussi rasante, l'action secondaire, pour des épaisseurs croissantes de L, croît constamment jusqu'à une valeur limite sans passer par un maximum; on comprend, en effet, que les rayons secondaires du volume *ghk* traversent la lame L très obliquement sous une épaisseur très supérieure à l'épaisseur normale de cette lame; ils sont, par suite, assez affaiblis pour être assez peu importants avant même que la lame L ait l'épaisseur correspondant au maximum d'intensité des rayons secondaires qu'elle émet.

L'influence de l'émission secondaire par l'air est négligeable dans les études que j'ai faites sur les corps qui transforment notablement les rayons X, d'abord parce que les rayons secondaires de ces corps sont beaucoup plus actifs que ceux de l'aluminium, en second lieu parce qu'il est alors possible de réduire la lame L à une surface de quelques centimètres carrés seulement; or, les

dimensions linéaires de la *fig.* 14 étant supposées toutes divisées par 10, le *volume* d'air *egkh* est réduit dix fois plus que la *surface* de la lame L et, par suite, les rayons secondaires de l'air sont dix fois plus réduits que ceux de la lame L, déjà beaucoup plus actifs. D'ailleurs, le volume d'air *ghk* postérieur à la lame L n'interviendra rigoureusement pas dans les observations suivantes sur les rayons secondaires antérieurs; la lame L sera, en effet, toujours assez épaisse pour arrêter les rayons X. J'ai employé particulièrement de petits miroirs de cuivre, de zinc, de fer, nickel, platine, d'environ 4^{cq} de surface, assez épais pour arrêter sensiblement tous les rayons X incidents. Dans ces conditions, les divers corps sont comparés sous une épaisseur bien supérieure à celle qui détermine l'activité maximum de leurs rayons secondaires.

Même si l'on admet que chaque élément de matière frappé par les rayons X rayonne en tous sens isotropiquement, l'émission secondaire d'un miroir métallique plan ne saurait être indépendante de l'incidence *i* des rayons X ni de l'angle *s* que les rayons S font avec la normale au miroir; les rayons X sont, en effet, absorbés et filtrés par la *couche d'émission* des rayons S, inégalement suivant l'*incidence i*, et, d'autre part, l'augmentation de l'*émergence s* fait diminuer l'épaisseur de la couche d'émission secondaire comptée suivant la normale. En particulier, l'activité des rayons secondaires émis par un miroir de surface invariable s'affaiblit beaucoup quand l'incidence *i* ou l'émergence *s* se rapprochent d'un angle droit. Les résultats généraux de comparaison des différents corps, exposés plus loin ([1]), sont, dans toutes les expériences que j'ai effectuées, les mêmes pour des incidences *i* et des émergences *s* très diverses. Les résultats numériques particuliers indiqués ci-après ont été obtenus en faisant sensiblement les angles *i* et *s* tous deux égaux à 45 degrés.

([1]) *Voir* § 8 de ce Chapitre.

3. *Influence de la nature des rayons* X *incidents sur les résultats de la comparaison de divers corps.* — Les rapports des temps t de décharge, dont les inverses permettent de comparer les activités électriques de divers faisceaux secondaires, varient suivant la nature des rayons X incidents. On s'en aperçoit en recommençant la comparaison après avoir fait changer la pression du gaz raréfié dans le tube focus ([1]). Au lieu de diminuer cette pression, on peut encore rendre les rayons X plus pénétrants, sans modifier l'état intérieur du tube, en disposant sur le trajet des rayons X, en AA (*fig.* 14), une lame plus ou moins opaque; les rayons X filtrés par cette lame sont plus pénétrants que l'ensemble du faisceau incident.

Voici un exemple obtenu avec le dispositif de la *fig.* 14 en plaçant à demeure, sur la fenêtre o'_1 de l'électroscope, une feuille $a'b'$ d'aluminium de $0^{mm},11$ d'épaisseur. Les rayons secondaires traversaient cette lame et les 18^{cm} d'air atmosphérique qui la séparaient du centre de la plaque rayonnante L. Dans une première série de comparaisons, les rayons X sortaient de l'ouverture ab, pratiquée dans l'écran de plomb E_1E_1, à travers une feuille d'aluminium d'épaisseur voisine du micron, n'absorbant pas sensiblement les rayons du tube focus; les rapports des temps de décharge étaient alors les suivants :

Zinc.	Cuivre.	Paraffine.	Plomb.	Aluminium.	Fer.
1	1,02	1,4	1,7	4,0	4,3

Ces rapports devenaient :

1	1,1	1,2	1,5	3,0	3,4

si une lame d'aluminium d'épaisseur $0^{mm},12$ était placée en AA sur la fenêtre de sortie des rayons X.

([1]) Si le tube focus employé n'est pas relié à la trompe à mercure, on peut encore modifier aisément la pression intérieure par l'emploi de l'ingénieux *osmorégulateur* de M. P. Villard (voir *Comptes rendus*, t. CXXVI, p. 1413; 1898).

La méthode de comparaison suivante donne des résultats d'une signification plus simple : Soient, par exemple, une lame A_1 d'*ébonite,* une lame A_2 d'*aluminium* et une lame A_3 de *cuivre* d'épaisseurs différentes et choisies de manière que les trois lames affaiblissent également l'action des rayons X sur l'électroscope C. On a, pour constater ce fait, déplacé l'électroscope C de manière qu'il reçoive les rayons X; on l'a replacé, après l'étude et le choix des trois lames, dans la position de la *fig.* 14, de manière qu'il reçoive les rayons secondaires issus d'un miroir L de *cuivre* [1]. L'expérience montre alors que l'action électrique des rayons secondaires du cuivre est également affaiblie si l'on dispose en AA, sur le trajet des rayons X (*fig.* 14), l'une ou l'autre des deux lames A_1 (ébonite) et A_2 (aluminium) qui affaiblissaient également l'action directe [2] des rayons X. Mais la lame de *cuivre,* qui équivalait aux lames A_1 et A_2 pour la transmission directe des rayons X, n'équivaut plus maintenant à A_1 et A_2 : quand cette lame est placée en AA sur le trajet des rayons X, l'action électrique des rayons secondaires du cuivre est affaiblie *notablement plus* que si la lame placée en AA était la lame d'ébonite A_1 ou d'aluminium A_2, par exemple

---

[1] L'électroscope est porté par un solide bras mobile horizontalement autour de la plate-forme d'un goniomètre et équilibré, de l'autre côté de cette plate-forme, par un contrepoids. Quand l'étude directe des rayons X est terminée et l'électroscope ramené à la position représentée dans la *fig.* 14, on dispose le miroir L de cuivre au-dessus du centre du goniomètre, à la hauteur de la fenêtre o'_1 de l'électroscope; afin d'éviter que quelques rayons X ne se diffusent ailleurs que sur le miroir L, dans toutes les expériences ce miroir descend notablement au-dessous du faisceau des rayons X, qui ne peuvent ainsi jamais frapper la colonne de laiton sur laquelle est fixé le miroir.

[2] La filtration des *rayons* X affaiblit d'ailleurs l'action électrique des rayons secondaires bien moins que l'action directe des rayons X, ce qui peut s'exprimer ainsi : Les rayons secondaires d'un corps donné proviennent surtout des rayons X les plus pénétrants du faisceau incident (*voir* § 7, *Étude électrique de la transformation;* Chap. III, § 2 et 4, et Chap. IV, § 5).

1,3 fois autant, le miroir de cuivre étant placé à 8^{cm} d'une mince feuille d'aluminium battu $a'b'$ qui recouvre seule la fenêtre o'_1 de l'électroscope C.

On peut exprimer ce résultat, en s'aidant de l'analogie optique, sous cette forme : parmi les groupes de rayons inégalement pénétrants que renferme le faisceau hétérogène des rayons X, la lame A_3 de *cuivre* a absorbé plus particulièrement des rayons X qui excitaient plus que les autres l'émission secondaire du miroir L de cuivre.

Sous cette forme, le résultat observé semble analogue avec le suivant : la luminescence d'un corps solide ou liquide éclairé par un faisceau de lumière est due surtout à la transformation de ceux des rayons lumineux incidents que le corps étudié absorbe le plus. Toutefois cette analogie est assez limitée : les corps fluorescents ou phosphorescents sous l'action de la lumière présentent le plus souvent des phénomènes très nets d'*absorption élective;* ainsi, dans les phénomènes de fluorescence autrefois étudiés par J. Herschell sous le nom de *diffusion épipolique*, l'émission de lumière est localisée dans une couche superficielle du corps attenant à la face d'entrée du faisceau lumineux, et Sir G. Stokes a montré que le faisceau lumineux incident est complètement dépouillé, dans cette couche superficielle, de certains rayons seuls capables d'exciter la fluorescence; les autres rayons ne sont pas absorbés, et demeurent inactifs.

L'émission secondaire, d'un métal lourd par exemple, est aussi localisée dans une couche superficielle d'épaisseur e très faible (par exemple de l'ordre du micron pour l'or); mais les rayons X sont loin d'être complètement dépouillés dans cette couche de la propriété d'exciter l'émission de rayons secondaires transformés. Une nouvelle couche adjacente à la face de sortie des rayons incidents, à l'inverse de ce qui arrive pour les luminescences provoquées par la lumière, est de nouveau le siège d'une émission en tous sens

de rayons secondaires postérieurs transformés. La minceur de la couche d'émission antérieure et celle de la couche postérieure sont dues non pas au faible pouvoir de pénétration des rayons X excitateurs, mais surtout à celui des rayons secondaires plus absorbables qui en dérivent.

Conformément à cette explication, si l'on ouvre une pile de feuilles minces de cuivre, par exemple, d'abord serrées en un seul bloc, l'intensité des rayons secondaires envoyés latéralement dans un électroscope augmente aussitôt; les feuilles du milieu rayonnent maintenant au dehors même si leur présence était indifférente quand elles étaient serrées entre les feuilles extrêmes; c'est donc bien que leurs rayons secondaires étaient arrêtés par les feuilles qui les séparaient de la surface antérieure ou de la surface postérieure de la feuille unique formée par la superposition des diverses feuilles minces. Il n'y a donc pas dans l'excitation secondaire de phénomène électif comparable à celui que présente la diffusion épipolique d'Herschell. Même la différence entre l'action exercée, dans l'expérience déjà signalée, par la lame A_3 de cuivre et les actions exercées par les lames A_1 et A_2 d'ébonite et d'aluminium n'est qu'une différence de *degré;* les trois lames affaiblissent chacune les rayons secondaires lorsqu'elles filtrent les rayons X; de même il n'y a pas de substance dont une lame suffisamment épaisse n'affaiblisse les rayons X qui la traversent.

Enfin le phénomène électif signalé dans l'excitation secondaire n'est pas tout à fait caractéristique de l'identité de nature de la feuille A_3 filtrant les rayons X et de la lame rayonnante L, toutes les deux en cuivre dans l'exemple cité. Quand, par exemple, le miroir L de *cuivre* était remplacé par un miroir de *nickel,* les filtrations des rayons X par les lames A_1 d'ébonite ou A_2 d'aluminium affaiblissaient également l'action rayonnante du miroir de nickel; mais, ici encore, l'action de la lame A_3 de cuivre

n'était pas équivalente à celle des lames A_1 et A_2 ; la filtration des rayons X par la lame A_3 de cuivre affaiblissait l'action rayonnante du miroir de nickel 1,2 fois autant que ne le faisaient les filtrations des rayons X par les lames A_1 ou A_2, rapport assez voisin du rapport 1,3 observé dans les mêmes conditions avec le miroir de cuivre ([1]). On peut exprimer ce résultat en disant que le groupe des rayons X, plus particulièrement actifs dans l'excitation secondaire du cuivre, a une importante région commune avec le groupe des rayons X du même faisceau, qui sont plus particulièrement actifs dans l'excitation du nickel. Ce fait semble pouvoir être rapproché de ce que le nickel transforme aussi les rayons X et même plus profondément encore que le cuivre, comme on le verra plus loin. Il présente aussi une certaine analogie avec ce fait qu'en première approximation, et surtout pour les rayons X très pénétrants, deux lames, l'une de cuivre, l'autre de nickel, sont également transparentes aux rayons X lorsque leurs épaisseurs sont proportionnelles respectivement aux *densités* du cuivre et du nickel, sans que la profonde différence de nature chimique des deux métaux modifie beaucoup l'égalité d'absorption imprimée aux rayons X par deux masses égales des deux métaux.

4. *Influence des épaisseurs d'air ou de divers milieux traversées par les rayons secondaires entre le corps rayonnant et l'électroscope.* — Les rapports des temps de décharge correspondant aux actions électriques secondaires de divers corps, et même l'ordre dans lequel se classent ces divers rapports, sont modifiés profondément si la comparaison des mêmes corps est refaite avec le même faisceau

---

([1]) J'ai obtenu des résultats voisins des précédents en étudiant les actions électriques des rayons secondaires du cuivre, du nickel et d'autres métaux par la méthode du condensateur, qui utilise les rayons secondaires avant même qu'ils n'aient été affaiblis par la traversée d'une couche d'air atmosphérique (*voir* p. 86 et *fig.* 10).

de rayons X, mais en modifiant l'épaisseur d'air atmosphérique qui sépare le corps rayonnant LL (*fig.* 14) et la paroi d'aluminium $a' b'$ de l'électroscope C, ou bien en modifiant l'épaisseur de cette paroi $a' b'$, ou, d'une manière générale, en modifiant l'épaisseur et la nature des corps interposés entre la surface de la lame rayonnante LL et la face interne de la paroi $a'b'$. Ainsi, dans la première série d'expériences citée au commencement du paragraphe précédent, l'action électrique secondaire du fer, mesurée par l'inverse du temps de décharge, était 4,2 fois moins grande que celle du cuivre, les rayons secondaires du fer ou du cuivre étant émis à travers 18^{cm} d'air et une paroi $a' b'$ d'aluminium de $0^{mm},11$; l'ordre des actions électriques secondaires décroissantes était alors : *zinc, cuivre, aluminium, fer*. Avec la même épaisseur d'air, mais en remplaçant la paroi $a' b'$ d'aluminium épaisse de $0^{mm},11$ par une mince feuille d'aluminium battu d'épaisseur voisine du micron, l'action des rayons du fer augmentait beaucoup plus que celle des rayons du cuivre et les rayons du cuivre n'étaient alors que 1,4 fois aussi actifs que ceux du fer. La mince paroi $a'b'$ d'aluminium étant conservée, mais l'épaisseur d'air atmosphérique traversée en dehors de l'électroscope par les rayons secondaires étant elle-même réduite progressivement à partir de 18^{cm}, l'action électrique des rayons secondaires du fer dépassait successivement l'action électrique des rayons secondaires de l'aluminium, du cuivre, du zinc; pour une épaisseur d'air réduite à 7^{cm}, l'action électrique des rayons secondaires du fer était déjà 1,26 fois aussi grande que celle des rayons secondaires du cuivre, et elle augmentait de plus en plus par rapport à celle du cuivre quand l'épaisseur d'air séparant les miroirs de fer ou de cuivre et l'entrée $a'b'$ de l'électroscope continuait à diminuer. L'ordre des actions électriques décroissantes devenait ainsi : *fer, zinc, cuivre, aluminium*, et il se maintenait désormais invariable quand l'épaisseur d'air diminuait de plus en plus.

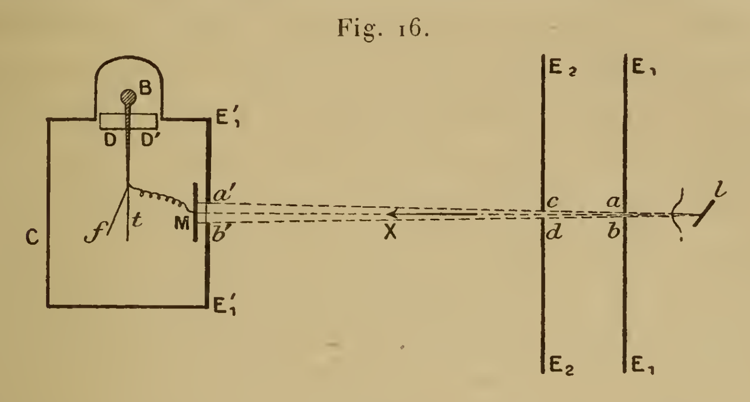
Ces exemples suffisent à montrer que les activités secondaires relatives des divers corps et l'ordre même de ces activités sont extrêmement variables en général avec les épaisseurs d'air, d'aluminium, etc., traversées par les rayons secondaires en dehors du récepteur électrique employé. Il y a exception seulement pour l'*ordre limite* établi avec des épaisseurs d'air de plus en plus faibles, les rayons secondaires agissant à travers une mince feuille d'aluminium battu $a'b'$, ou bien passant à travers les mailles d'une toile métallique placée en $a'b'$; par exemple, le fer est plus actif que le zinc à travers 7^{cm} d'air et surtout à travers de plus faibles épaisseurs d'air; le platine, moins actif que le fer à travers quelques centimètres d'air, devient beaucoup plus actif que le fer à travers quelques millimètres d'air et surtout à travers de plus faibles épaisseurs. J'ai trouvé ainsi, pour les métaux suivants, l'ordre limite d'action électrique décroissante :

Platine, Étain, Nickel, Zinc, Cuivre, Aluminium.
ou
Fer,

Cet ordre limite s'est maintenu le même dans mes diverses expériences. J'ai aussi comparé les actions secondaires de divers métaux à l'aide des actions de décharge des rayons X tombant directement dans l'électroscope C de la *fig.* 14, déplacé à cet effet; la feuille f de l'électroscope se trouvait à gauche de la lame métallique t (*fig.* 16), et cette lame t était reliée électriquement à un miroir M, opaque aux rayons X, formé successivement des divers métaux à comparer. Comme il sera dit plus loin (Chap. III, § 4), la décharge du condensateur M$a'b'$ est alors due, pour une part invariable, à l'action des rayons X, qui rendent la lame d'air comprise entre M et $a'b'$ conductrice de l'électricité et, pour une part variable avec la nature du métal M, à une action analogue exercée par les rayons secondaires issus du métal M; l'action du métal est prépondérante

si le métal transforme beaucoup les rayons X (c'est le cas des métaux cités, l'aluminium excepté), si l'épaisseur de la lame d'air comprise entre les deux armatures M et $a'b'$ du condensateur n'est pas notablement supérieure à 1^{cm} environ et si les rayons X utilisés ne sont pas trop peu

Fig. 16.



pénétrants. Or c'est le condensateur à armature M de platine qui se décharge le plus rapidement, et l'ordre des divers métaux à ce point de vue coïncide avec l'*ordre limite* trouvé quand les miroirs rayonnants placés en dehors de la paroi $a'b'$ en étaient séparés par une couche d'air de plus en plus mince.

Pour interpréter les résultats précédents, reportons-nous à l'expérience dans laquelle les rayons secondaires produits sur un miroir L de cuivre ou sur un miroir L de fer, en dehors de l'électroscope C (*fig.* 14), pénètrent dans cet électroscope à travers une mince feuille d'aluminium battu $a'b'$ après avoir traversé 18^{cm} d'air. Les nombres cités montrent que l'interposition d'une feuille d'aluminium d'épaisseur $0^{mm},11$ en $A'A'$ sur le trajet des rayons secondaires réduit l'action électrique des rayons du fer $\frac{4,3}{1,4}$ fois autant, soit 3 fois autant que l'action électrique des rayons du cuivre. C'est dire que les rayons secondaires envoyés par le fer dans l'électroscope sont bien moins pénétrants que ceux du cuivre. Dès lors les inégales influences de l'épaisseur d'air traversée par les rayons secondaires des

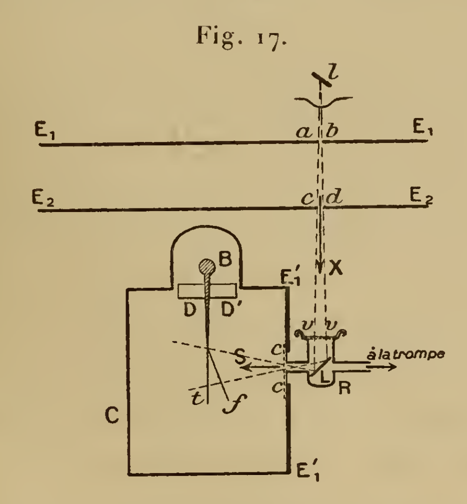
divers métaux doivent résulter des inégales absorptions que ces rayons secondaires éprouvent dans l'air, suivant la nature du métal qui les émet. Ainsi, les rayons secondaires étant émis à travers 7^{cm} d'air et la feuille d'aluminium battu $a'b'$, l'action électrique des rayons secondaires du fer était 1,26 fois aussi grande que celle des rayons du cuivre, tandis qu'à travers 18^{cm} d'air elle était au contraire 1,4 fois plus faible que celle du cuivre, c'est-à-dire était réduite $1,26 \times 1,4$ fois autant, soit 1,8 fois autant que celle du cuivre; les conditions géométriques de l'expérience restant les mêmes pour les deux miroirs de fer et de cuivre comparés, l'influence géométrique de la distance, qui résulte de la loi du carré des distances, était la même pour les rayonnements des deux miroirs, en sorte que la couche d'air comprise entre le 7e et le 18e centimètre à partir du centre de chaque miroir devait absorber les rayons secondaires du fer beaucoup plus que ceux du cuivre, de manière à en réduire 1,8 fois autant l'action électrique exercée sur l'électroscope C. La suite de ces recherches justifie cette interprétation.

5. *Absorption des rayons secondaires par l'air.* — L'affaiblissement de l'action électrique des rayons secondaires avec l'augmentation de la distance comprise entre le miroir rayonnant L et la paroi $a'b'$ d'aluminium très mince de l'électroscope C est uniquement dû à la transmission par l'air, si l'on supprime l'influence géométrique de la distance; il faut pour cela, avec le dispositif de la *fig.* 14, déplacer l'électroscope C derrière l'écran $E'_2E'_2$ fixe et donner à l'ouverture o'_1 de l'électroscope une étendue assez grande pour recevoir à toute distance la totalité du faisceau de rayons secondaires que le miroir L, de quelques centimètres carrés de surface, envoie à travers l'ouverture invariable o'_2 de l'écran fixe $E'_2E'_2$. On trouve ainsi que la transmission par la couche d'air, comprise entre 7^{cm} et 18^{cm} à partir du centre du miroir rayonnant L, affai-

blit à peine, en général, l'action électrique des rayons secondaires du cuivre, tandis qu'elle réduit celle des rayons du fer sensiblement dans le rapport (1,8) déjà trouvé par comparaison des deux métaux dans les mêmes conditions. Un affaiblissement du même ordre des rayons secondaires de certains métaux très lourds, comme le platine, le plomb, résulte de la simple transmission dans la couche d'air comprise entre 1^{cm} et 3^{cm} seulement ([1]).

Il m'a paru intéressant de m'assurer, en raréfiant l'air autour du métal rayonnant, que l'affaiblissement par transmission dans l'air est bien dû à la présence même de l'air et non pas à une influence spéciale de la distance indépendante de la loi du carré des distances : dans un petit récipient de verre R (*fig.* 17) communiquant avec

Fig. 17.



une trompe à eau est disposé un petit miroir L métallique qui reçoit des rayons X d'un tube un peu mou à travers une paroi *vv* assez transparente, formée d'une peau de vessie soutenue par une toile métallique. Le récipient R

([1]) Par suite, si l'expérience de la *fig.* 8 (p. 45) est faite avec une lame MM d'un métal tel que le plomb, on peut, sans affaiblir notablement l'action électrique des rayons secondaires, supprimer la partie supérieure de la lame MM; la région inférieure de MM séparée de *aa* par quelques centimètres d'air au plus produit à elle seule la plus grande partie de l'action électrique secondaire.

porte une tubulure latérale que termine un petit plateau métallique *cc* soudé à la paroi $E'_1E'_1$ de l'électroscope C. Le centre du plateau *cc* est percé suivant un orifice circulaire de 1^{cm} de diamètre; une très fine toile métallique de laiton, soudée au bord du plateau *cc*, en recouvre l'orifice circulaire et supporte une pellicule de collodion de 3 microns seulement d'épaisseur collée par ses bords au plateau *cc* avec du collodion plus épais. Dès que les rayons secondaires du miroir L sont sortis du récipient R à travers la mince couche de collodion, ils se propagent dans le champ électrique de l'électroscope, dont ils rendent l'air conducteur de l'électricité, et déchargent ainsi la feuille électrisée *f* sans avoir subi d'autre absorption que dans la mince pellicule et dans les $4^{cm},5$ environ d'air compris entre cette pellicule et le centre du miroir rayonnant L. Avec la trompe à eau, on raréfie l'air autour du miroir L et l'on observe l'action électrique des rayons secondaires en suivant, comme d'habitude, le déplacement de la feuille *f* au moyen d'un viseur à court foyer muni d'un oculaire micrométrique; on laisse ensuite rentrer l'air dans le récipient et l'on constate alors que l'action électrique des rayons secondaires a notablement diminué si le miroir L est formé d'un métal lourd tel que le fer ou le nickel, l'étain et surtout le platine, le plomb. L'action reprend sa valeur primitive si l'air est ramené à la raréfaction primitive. Ainsi, l'action électrique des rayons secondaires émis par un miroir L de platine était divisée par 2 quand la pression de l'air du récipient R s'élevait de $2^{cm},8$ à $21^{cm},8$ de mercure; elle reprenait sa valeur primitive quand la pression atmosphérique était rétablie dans le récipient. On va voir que le platine émet réellement des rayons secondaires encore plus absorbables que ce premier résultat ne semble le montrer.

6. *Hétérogénéité des faisceaux de rayons secondaires.* — L'action électroscopique, radiographique ou

radioscopique d'un faisceau de rayons secondaires issu d'un corps quelconque subit, quand le faisceau est transmis par une épaisseur déterminée d'un certain milieu, un affaiblissement d'autant moindre que les milieux supplémentaires déjà traversés par le faisceau sont plus nombreux et plus épais. En particulier, les actions des rayons secondaires transmis par des épaisseurs d'un milieu défini, qui croissent en progression arithmétique, ne vont point en décroissant en progression géométrique, comme il devrait arriver forcément si le faisceau était homogène à la manière d'un faisceau de lumière monochromatique. En s'aidant de l'analogie optique, on peut exprimer ce résultat comme le résultat semblable obtenu avec les rayons X, en disant : Le faisceau secondaire étudié dans chaque expérience se comporte comme un mélange de rayons divers inégalement pénétrants; une série d'écrans successifs *filtrent* ces divers rayons en absorbant surtout les uns et laissant passer surtout les autres, qui forment un faisceau moins actif et plus pénétrant que l'ensemble du faisceau incident ([1]).

Les filtrations successives diminuent l'hétérogénéité du faisceau, sans cependant la supprimer. J'ai trouvé, par exemple, que, pour un faisceau secondaire émané du *zinc* et déjà filtré par 20^{cm} d'air, une feuille de mica d'épaisseur de 35 microns, placée entre le zinc et l'électroscope, divisait l'action électroscopique du faisceau par 1,71; mais une seconde lame identique interposée ensuite sur le trajet du faisceau divisait l'action électrique par 1,58 seulement.

De même, dans les expériences sur l'influence de la distance qui ont été décrites (§ 5), j'ai trouvé que les couches

([1]) Dans cette analogie optique on admet implicitement que les divers rayons d'un faisceau secondaire coexistent sans s'altérer mutuellement.

d'air atmosphérique de même épaisseur ajoutées successivement entre le métal rayonnant L (*fig.* 14) et l'électroscope C sont de plus en plus transparentes.

Dans l'expérience de la *fig.* 17, des rentrées successives de masses d'air égales dans l'atmosphère raréfiée qui entoure le miroir L réduisent de moins en moins l'action électrique des rayons secondaires. Ainsi, quand la pression de l'air du récipient R, primitivement égale à $2^{cm},8$ de mercure, subissait trois augmentations successives de $9^{cm},5$ de mercure, l'action électrique des rayons secondaires du platine était divisée successivement par les nombres décroissants : 1,7, 1,2 et 1,1; enfin, la pression ainsi amenée à $31^{cm},3$ passant d'un seul coup à 76^{cm}, l'action électrique secondaire ne subissait plus qu'une diminution relative voisine de $\frac{1}{100}$.

Si l'on admet que l'absorption par une même masse d'air est indépendante de la pression du gaz ([1]), les épaisseurs d'air de $4^{cm},5$ sous la pression de $2^{cm},8$ ou bien sous la pression de $9^{cm},5$ équivalent respectivement à $0^{cm},16$ ou bien à $0^{cm},55$ d'air à la pression atmosphérique; alors on peut dire que, même supposés déjà filtrés par $0^{cm},16$ d'air et une pellicule de collodion de 3 microns, les rayons secondaires du platine exerceraient une action électroscopique 1,7 fois plus faible quand ils auraient traversé une simple couche d'air supplémentaire de $0^{cm},55$ d'épaisseur.

Il y a des rayons secondaires bien plus absorbables encore : à partir de $2^{cm},8$ de pression, une augmentation de

---

([1]) Cela revient à admettre que l'absorption est proportionnelle au nombre des molécules de gaz rencontrées par le faisceau de rayons quelles que soient les distances mutuelles des molécules.

D'après les vues théoriques que j'ai indiquées au Chap. IV, § 4, la proportionnalité signalée cesserait d'être exacte pour des rayons formés de vibrations ayant des longueurs d'onde comparables ou supérieures au double de la distance moyenne des molécules du gaz considéré.

pression de $0^{cm},8$ seulement réduisait l'action électroscopique des rayons secondaires du miroir L de platine aux $\frac{9}{10}$ de sa valeur primitive; or cette variation de pression équivaudrait à la traversée d'une couche d'air à la pression atmosphérique de $0^{cm},047$ seulement; avec le coefficient de transmission défini par le résultat précédent, on trouve que les deux premiers millimètres d'air à la pression atmosphérique réduiraient l'action à la fraction $\left(\frac{9}{10}\right)^4$, soit aux $\frac{2}{3}$ de sa valeur primitive, c'est-à-dire supprimeraient $\frac{1}{3}$ de l'action de décharge des rayons secondaires. Or ce nombre ne s'applique réellement qu'à l'ensemble du faisceau secondaire, et non pas aux rayons homogènes les plus absorbables de ce faisceau, et, d'autre part, le faisceau expérimenté a été dépouillé vraisemblablement d'une notable partie de ses rayons les plus absorbables en traversant la pellicule de collodion de trois microns et les $4^{cm},5$ d'air à la pression de $2^{cm},8$ de mercure qui équivalent à $0^{cm},55$ d'air à la pression atmosphérique. Le résultat ainsi calculé n'est donc qu'une limite très inférieure de l'absorption des rayons secondaires du platine par les premières couches d'air à la pression atmosphérique adjacentes au métal nu; on peut dire que le premier millimètre d'air atmosphérique adjacent au platine enlève aux rayons secondaires de ce métal une grande partie de leur activité électrique. L'absorption est bien moins importante avec les rayons secondaires de l'étain, du fer et du nickel; dans les conditions de l'expérience, elle est presque insensible avec ceux du zinc et du cuivre.

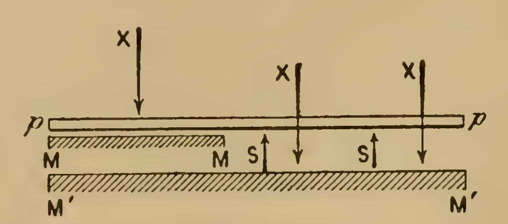
L'énergique filtration par l'air des rayons secondaires, tels que ceux du platine, du plomb, permet de comprendre pourquoi les rayons secondaires de tels métaux, lorsqu'ils sont déjà transmis par plusieurs centimètres d'air, sont à peine affaiblis par une mince feuille d'aluminium battu, tandis que la même feuille supprime une notable partie

de l'action électrique des rayons secondaires des mêmes métaux qui n'ont pas encore été filtrés par l'air ; ce dernier fait se constate au moyen du dispositif de la *fig* 16.

Si l'on dispose en M un miroir d'aluminium ([1]), puis un miroir de platine, la différence des deux actions de décharge exercées dans les deux cas par les rayons X qui frappent la surface M représente assez exactement l'effet dû aux rayons secondaires du platine. Or cet effet du platine est réduit à environ moitié si l'on recouvre la surface M du miroir de platine avec une feuille d'aluminium d'épaisseur voisine du micron.

Les expériences relatives à l'action radiographique des rayons secondaires fournissent des résultats analogues : Un faisceau de rayons X tombe sur la plus grande partie de la surface d'une plaque photographique *pp* (*fig*. 18)

Fig. 18.



à l'abri de la lumière, en traverse le verre pour venir impressionner la couche sensible tournée en dessous et *nue*, puis frappe une plaque MM dont les rayons secondaires viennent à leur tour impressionner la couche sensible. Pour distinguer la seconde action de la première, il suffit de placer la plaque MM contre la couche sensible *pp* ; si l'on supprime tous les corps, tels que M′M′, qui, placés dans le voisinage de la plaque sensible, pourraient lui envoyer aussi des rayons secondaires, l'impression est ren-

([1]) L'aluminium employé est épais de quelques millimètres et adossé à un miroir de plomb épais; de cette manière, les rayons X que laisse passer l'aluminium sont arrêtés par le plomb, et les rayons secondaires de celui-ci sont suffisamment arrêtés par l'aluminium.

forcée au-dessus de la plaque MM, très faiblement si MM est en aluminium, fortement si MM est formé d'un métal qui transforme beaucoup les rayons X; l'impression due aux rayons secondaires d'un métal est alors comparable à celle qui est due aux rayons X seuls. Dans ces conditions, une bande étroite d'aluminium battu d'épaisseur comparable à un micron seulement n'affaiblit que très légèrement le renforcement dû aux rayons secondaires du cuivre, du zinc, mais affaiblit notablement celui de l'étain et supprime presque complètement celui du zinc amalgamé, du platine, du plomb.

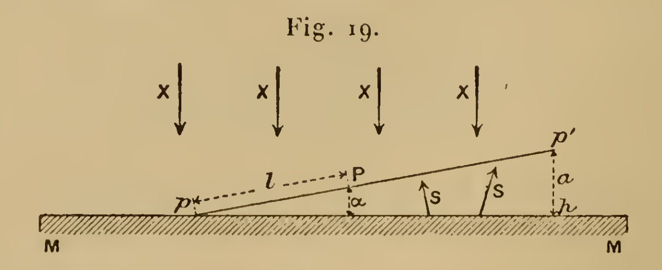
Si le miroir métallique MM est éloigné au-dessous de la couche sensible de *pp*, l'absorption par l'aluminium battu très mince, qui était si importante à très petite distance pour les rayons du platine, par exemple, diminue très vite dès que l'épaisseur d'air qui sépare MM de la couche sensible dépasse environ 1^{mm} et devient bientôt insignifiante. En même temps, le renforcement dû aux rayons secondaires du métal diminue assez peu pour le cuivre, le zinc, notablement pour l'étain et surtout le platine, le plomb; on suit la variation de l'action du miroir, en comparant sur une même plaque sensible *pp*, comme le montre la *fig.* 18, le renforcement dû à MM placé assez près de *pp* au renforcement dû à un miroir M'M' de même matière placé plus loin de la couche sensible; on remplace la bande d'aluminium battu très mince par une bande d'aluminium d'épaisseur de $\frac{1}{10}$ de millimètre ou davantage, placée contre la couche sensible de *pp*; au développement, la trace de cette bande apparaît sous forme d'une région moins impressionnée et cette trace est bien plus accusée sur la région de *pp* située au-dessus de MM que sur la région moins impressionnée, soumise à l'action des rayons secondaires de M'M'; l'aluminium, sans agir notablement par son propre rayonnement secondaire, arrête les rayons secondaires de M'M' bien moins que ceux

de MM, si le métal de ces deux plaques est de l'étain, du platine, du plomb, etc.; l'action des rayons du miroir M'M' est plus faible que celle du miroir MM, et cette influence de la distance parcourue par les rayons secondaires est bien plus grande pour le platine, le plomb que pour le zinc, le cuivre, par exemple; cette différence s'explique bien par l'absorption par l'air.

L'expérience de la *fig.* 18 est refaite dans une cloche où l'air est, dans une première expérience, à la pression atmosphérique, dans une seconde à la pression de 1^{cm} de mercure; les rayons X entrent dans la cloche à travers une paroi d'ébonite. L'influence de la distance diminue de la première expérience à la seconde pour des métaux tels que le platine, le plomb; elle n'est guère modifiée pour le cuivre, le zinc.

L'influence de la distance se voit plus rapidement en inclinant une plaque sensible pp' (*fig.* 19) d'un petit

Fig. 19.



angle sur une plaque MM de métal, par exemple. L'impression des rayons X en chaque point P de la couche sensible nue tournée vers MM est renforcée par l'impression due aux rayons secondaires S que le métal MM envoie en P à travers une épaisseur d'air dont la valeur moyenne α croît lentement de o à a, proportionnellement à la distance l du point P au bord p de la couche sensible en contact avec MM. Une bande étroite découpée dans une feuille d'aluminium plus ou moins mince est disposée perpendiculairement au bord p en contact avec la couche sensible jusque près de p'.

Le cliché obtenu après développement montre, près de l'arête p du coin d'air traversé par les rayons secondaires, une zone de renforcement maximum de l'action des rayons X; cette zone, peu accusée avec le cuivre, le zinc, est très nette avec le platine, le plomb, et sa limite correspond à une épaisseur d'air d'environ 1^{mm}.

Il est intéressant d'observer la zone de renforcement non plus au bord p, mais au milieu même de la plaque, en remplaçant le miroir plan MM par un miroir cylindrique dont la surface est convexe et placée contre la couche sensible; la zone de renforcement maximum se produit alors le long de la génératrice de contact de la couche sensible et du miroir. Avec les deux dispositifs, on constate que la zone de renforcement maximum produite par le platine, par exemple, est sensiblement effacée là où elle croise une bande d'aluminium d'épaisseur comparable au micron, que l'on a disposée contre la surface de la couche sensible entre cette surface et celle du platine; la trace de la bande d'aluminium mince passe, au contraire, inaperçue en dehors de cette région.

Ces diverses expériences radiographiques ou électroscopiques s'accordent ainsi à montrer que les rayons secondaires sont très hétérogènes; les différents milieux qu'ils traversent les filtrent en ne laissant passer que les rayons les plus pénétrants. Les différents rayons secondaires émis simultanément par un même corps présentent une échelle de pouvoirs de pénétration divers, particulièrement étendue pour les éléments comme le fer, le nickel, l'étain et surtout le platine, le plomb. Les rayons les moins pénétrants des faisceaux émis par le platine, le plomb, sont très affaiblis par une épaisseur d'aluminium de l'ordre du micron, par une épaisseur d'air de l'ordre du millimètre, par une feuille de papier noir; ils produisent à eux seuls une grande partie de l'action électrique ou radiographique des rayons secondaires de ces éléments; de telles épaisseurs

d'aluminium ou d'air affaiblissent, au contraire, très peu l'action électrique ou radiographique des rayons du zinc ou du cuivre. Une fois dépouillé de cette partie la plus absorbable et la plus active, les rayons secondaires sont plus pénétrants, moins actifs et continuent à s'affaiblir en traversant, par exemple, les millimètres d'air suivants; comme nous avons vu pour les rayons du fer, ils s'affaiblissent encore parfois notablement dans les centimètres d'air suivants; ils deviennent graduellement aussi pénétrants que les rayons X qui les ont produits. On comprend très bien maintenant que cet affaiblissement par transmission dans l'air, le papier noir, l'aluminium, etc., s'exerçant très inégalement sur les faisceaux secondaires émis par divers corps sous l'influence du même faisceau de rayons X, l'ordre de divers corps au point de vue de leur activité secondaire puisse être bouleversé d'une expérience à l'autre. Nous en avons vu des exemples pour l'action électrique; de même l'action radiographique du plomb, par exemple, au moins égale à celle du cuivre tant que les métaux sont placés contre la couche sensible nue (*fig.* 18) lui devient considérablement inférieure quand la couche sensible est recouverte de papier noir ou d'aluminium mince. Les expériences de ce genre peuvent être regardées comme un moyen d'étudier la composition des divers faisceaux secondaires (1). Il résulte de la complexité des

(1) La complexité des faisceaux secondaires et l'importante absorption que certains rayons secondaires éprouvent en traversant des feuilles minces d'aluminium, de papier, ou de faibles épaisseurs d'air, ont échappé à M. D. Hurmuzescu qui, depuis mes premières recherches sur les rayons secondaires, a indiqué un certain nombre d'observations qu'il a faites de son côté sur la même question : *Sur le rôle du métal dans l'absorption et l'émission des rayons* X (*Société française de Physique*, 17 avril 1898); *Sur la transformation des rayons* X *par les différents corps* (*Comptes rendus*, t. CXXVIII, p. 422; 13 février 1899); *Sur la transformation des rayons* X (*Archives des Sciences physiques et naturelles de Genève*, 4e période, t. VII, p. 509; 1899). M. Hurmuzescu recevait les rayons secondaires dans un électroscope

faisceaux de rayons secondaires que l'épaisseur de la couche superficielle d'émission secondaire, telle qu'elle résulte d'une expérience particulière, est une moyenne entre les épaisseurs des diverses couches d'émission correspondant aux divers rayons secondaires du faisceau étudié, couches d'autant plus épaisses que les rayons correspondants sont plus pénétrants. Par exemple, une feuille d'or battu de $\frac{1}{10}$ de micron d'épaisseur envoie à quelques millimètres de distance de la fenêtre d'un électroscope fermée par une toile métallique des rayons secondaires peu pénétrants et assez actifs; d'autres feuilles d'or placées successivement sous la première ajoutent des actions de moins en moins fortes dues à des rayons secon-

---

à travers une paroi d'aluminium de $0^{mm},1$. Cette lame d'aluminium arrêtant les rayons S les plus absorbables, on comprend que les rayons S transmis n'étaient pas notablement absorbables par l'air. D'autre part, cette paroi d'aluminium suffisait à réduire l'action électrique des rayons du fer à moins que celle des rayons du zinc et de la paraffine, comme dans les expériences dont j'ai parlé au § 4 de ce chapitre, tandis que réellement l'action *complète* des rayons du fer est bien plus considérable. Aussi ne saurait-on dire en conclusion générale, comme le fait M. Hurmuzescu : « ... Un corps très absorbant comme le fer transforme beaucoup moins que la paraffine, et cette dernière, sous une épaisseur plus grande que 6^{mm}, transforme autant que le zinc....» (*Arch. de Genève, loc. cit.*, p. 540.) M. Hurmuzescu emploie l'expression de *transformer* plus ou moins les rayons X dans le sens d'*émettre* des rayons secondaires plus ou moins actifs; ses expériences ne portent pas sur le changement de pouvoir de pénétration caractéristique de la transformation, qui est mis en évidence par l'influence de l'ordre des filtrations sur l'activité des rayons secondaires (Chap. I, §§ 3 et 4, et ce Chapitre, §§ 7 et 8).

Dans l'expérience du Professeur Röntgen relative au renforcement de l'action des rayons X par des métaux placés contre la plaque photographique (*voir* 1re note du Chap. I), l'absorption des rayons secondaires par le papier noir avec lequel est entourée la couche sensible photographique rend moins frappantes les transformations éprouvées par les rayons X. La même circonstance se présente dans les expériences analogues de MM. Voller et Walter (*Wied. Annalen d. Physik*, t. LXI, p. 88-104; 1897); aussi la classification des divers métaux, d'après l'intensité de ce que les auteurs appellent la *réflexion diffuse des rayons* X, est-elle très éloignée de la vérité: le plomb, par exemple,

daires plus pénétrants; de trois à cinq feuilles, l'action n'augmente que de $\frac{1}{10}$ environ de sa valeur et ne varie plus désormais sensiblement quand le nombre des feuilles superposées croît davantage; c'est-à-dire que les feuilles que l'on ajoute au delà de la cinquième n'envoient que des rayons assez pénétrants et très peu actifs. Enfin la couche d'émission secondaire déterminée par l'expérience est d'autant plus mince que les rayons agissant sur le récepteur sont plus absorbables; elle diminue, en particulier, quand l'épaisseur d'air comprise entre le corps rayonnant et le récepteur diminue.

---

s'y trouve parmi les métaux les moins actifs, tandis que réellement ses rayons sont parmi les plus actifs s'ils agissent à petite distance dans l'air sur une couche sensible non recouverte de papier noir.

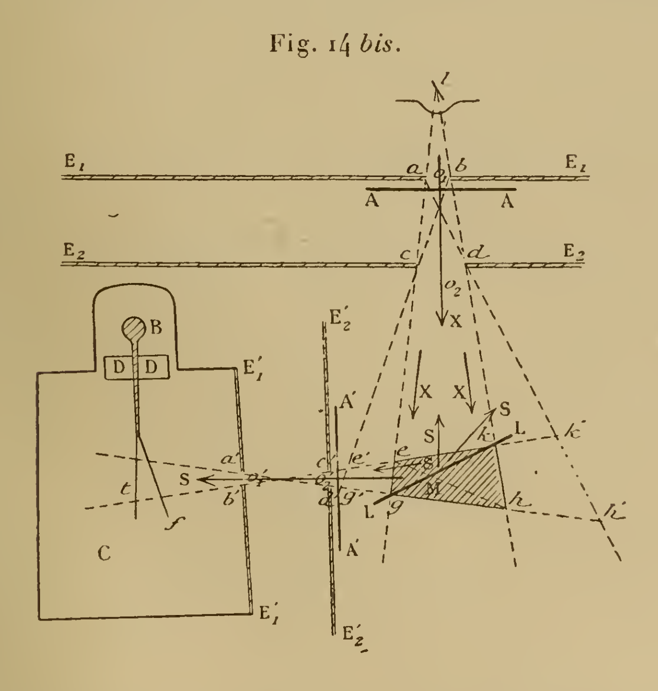
D'autres expériences radiographiques ont été faites, en particulier, par MM. Malagoli et Bonacini, principalement après la publication de mes premiers résultats (*Rendiconti della R. Accademia dei Lincei*, t. VII, p. 203, 3 avril 1898). Les auteurs ont retrouvé que les rayons secondaires des métaux lourds sont moins pénétrants que les rayons X incidents. Mais ils n'ont pas aperçu l'importance de l'absorption des rayons secondaires par plusieurs épaisseurs de papier noir avec lesquelles ils enveloppaient leurs plaques sensibles, ni par les quelques centimètres d'air qui séparaient, dans leurs expériences, la plaque sensible et le corps rayonnant. Ils ont admis, sans démonstration véritable, que ceux des rayons secondaires dont le pouvoir de pénétration diffère peu de celui des rayons X étaient des rayons purement diffusés; pour ceux qui se montraient fortement plus absorbables que les rayons X incidents, ils ont admis l'existence de la transformation d'après mes résultats et aussi d'après les expériences radioscopiques de Roïti que je cite plus loin (Chap. III, § 3) et qui sont postérieures à mes expériences.

Relativement à l'existence de la transformation, j'ai appris, après avoir publié mes principales expériences, que M. F.-V. Dwelshauvers-Dery avait répété l'expérience du Professeur Röntgen en ayant soin de disposer la couche sensible *nue* contre le métal, le papier noir enveloppant le tout, et qu'il avait remarqué l'importante absorption que le papier noir fait éprouver à certains des prétendus rayons X réfléchis. [*La réflexion des rayons* X (*Bulletin de l'Acad. roy. de Belgique*, 3e série, t. XXXI, n° 5, p. 482-487; 1896).] Cette expérience mérite d'être citée, car elle est, à ma connaissance, le seul exemple d'un résultat antérieur aux miens qui soit intimement lié à la *transformation* des rayons X.

7. *Étude électrique de la transformation.* — Le dispositif déjà décrit de la *fig.* 14 *bis* permet, dans chaque cas, de reconnaître les rayons secondaires qui, pénétrant dans la cage C de l'électroscope, proviennent d'une *transformation* des rayons X ayant altéré leur pouvoir de pénétration, et de distinguer par un nombre le changement de pouvoir de pénétration dû à la transformation seule, indépendamment de la complexité des faisceaux étudiés. Il suffit d'appliquer les mesures de vitesse de décharge à la méthode déjà décrite qualitativement (Chap. I[er], §§ 3 et 4).

Soit t la durée de l'action de décharge des rayons secon-

Fig. 14 *bis*.



daires de la plaque LL qui fait passer le bord visé de la feuille f de l'électroscope de la division n_1 à la division n_2 du micromètre oculaire du viseur, quand une certaine lame A d'aluminium, d'ébonite, de mica ou de paraffine est placée en AA sur le trajet des rayons X incidents. Je transporte cette lame de AA en A'A' contre l'ouverture $c'd'$, sur le trajet des rayons secondaires de LL, et je mesure la durée t' nécessaire pour la même décharge entre les mêmes divisions n_1 et n_2 du micromètre oculaire. Le

dispositif est tel que, dans la première expérience, les incidences diverses des rayons X sur AA sont peu écartées de l'incidence normale et correspondent suffisamment bien aux incidences diverses des rayons secondaires sur A'A' dans la seconde expérience; on peut alors dire, avec une approximation suffisamment calculée d'après les conditions géométriques du dispositif, que les rayons X et les rayons secondaires S ont été successivement filtrés par la même lame A sous une même épaisseur, très peu différente de l'épaisseur normale. Je me suis assuré, d'autre part, que les rayons secondaires émis par la face de sortie de la lame A n'intervenaient pas dans ces expériences, grâce à la faible activité des rayons secondaires de l'aluminium, de la paraffine et des divers corps très transparents que j'ai seuls employés à cet effet; en particulier la lame A pouvait être déplacée de o'_2 en o'_1 ou rapprochée de LL sans que l'action de décharge des rayons secondaires de LL variât sensiblement dans mes diverses expériences. Les deux durées t et t' devraient donc être égales si les rayons S étaient des rayons X diffusés sans changement de pouvoir de pénétration, je dirai, par convention : sans transformation. Or l'expérience montre que t' n'est jamais inférieur à t et qu'il lui est généralement supérieur, c'est-à-dire que les rayons S proviennent d'une transformation qui a diminué le pouvoir de pénétration des rayons X générateurs. Le coefficient $c = \frac{t'}{t} - 1$ distingue le degré de transformation des rayons S que la plaque LL envoie dans l'électroscope C; on peut convenir de l'appeler : *coefficient de transformation*. Voici un exemple relatif aux rayons secondaires qu'un miroir de nickel de 4^{cq} de surface exposé aux rayons X envoyait dans un électroscope à travers une mince feuille d'aluminium battu et la couche d'air d'épaisseur 7^{cm} qui le séparait de cette paroi. La lame A était une lame d'aluminium de $0^{mm},11$ d'épaisseur. Pour la position AA de cette lame, une certaine

décharge se faisait sous l'influence des rayons secondaires du nickel dans le temps $t = 10,3$ secondes; pour la position A'A', la même décharge par les rayons secondaires exigeait la durée $t' = 42$ secondes; puis, la lame A étant replacée en AA, on avait de nouveau $t = 10,3$ secondes; cette dernière mesure était nécessaire pour s'assurer que l'intensité ou la nature des rayons X émis par le tube focus n'avaient pas varié sensiblement. Le coefficient de transformation des rayons S reçus par l'électroscope dans cette expérience était $c = 2,08$, le dernier chiffre étant douteux. Il est facile de faire une série de déterminations de ce genre à $\frac{1}{50}$ près au moins. Ainsi une demi-heure après les observations précédentes, après douze déterminations du même genre, la durée t nécessaire pour la même décharge s'était élevée progressivement de 10,3 à 11,2 secondes; la nouvelle valeur de c pour le même miroir de nickel a été 3,10 au lieu de 3,08, c'est-à-dire n'a varié que de l'ordre des erreurs d'expériences, bien que t ait augmenté de $\frac{1}{10}$ de sa valeur; d'une manière générale, la valeur de c ne dépend pas de l'intensité absolue des rayons X, mais seulement de leur nature.

En même temps que les durées t et t', on peut déterminer la durée t_0 nécessaire pour produire la même décharge avec les rayons S, mais la lame A n'étant plus placée en AA sur le trajet des rayons X, ni en A'A' sur le trajet des rayons S. L'action des rayons S, mesurée par $\frac{1}{t_0}$ en l'absence de la lame A, est mesurée par $\frac{1}{t'}$ quand les rayons S traversent la lame A placée en A'A'. On peut donc appeler *coefficient de transmission* des rayons S à travers la lame A l'expression $\gamma_S = \frac{t_0}{t'}$, qui est le rapport de l'action $\frac{1}{t'}$ des rayons S transmis par A à l'action $\frac{1}{t_0}$ des mêmes rayons non transmis. De la même manière, on voit que, si l'émission secondaire était une simple diffusion sans changement de pouvoir de pénétration, le rapport

$\Gamma = \frac{t_0}{t}$ serait le coefficient de transmission de l'ensemble des rayons X ainsi diffusés. Le fait que c est supérieur à zéro signifie que γ_S est inférieur à Γ et caractérise le changement de pouvoir de pénétration des rayons par suite de la transformation seule, quelle que soit la complexité des faisceaux de rayons X et de rayons secondaires étudiés.

Les déterminations de c et de γ montrent que le degré de transformation défini par c va en augmentant et le pouvoir de pénétration défini par γ_S va en diminuant à mesure que l'on opère sur des rayons secondaires de moins en moins filtrés par l'air ou les divers milieux qui séparent le corps rayonnant LL et la paroi interne de l'électroscope. Par exemple, le miroir de nickel déjà employé pour l'expérience indiquée plus haut envoyait ses rayons secondaires à 7^{cm} de distance encore, mais à travers une paroi d'aluminium de $0^{mm},11$ placée en $c'd'$. On avait alors $c = 7,7$ et $\gamma_S = 0,047$ en employant comme lame filtrante, placée successivement en AA puis en A'A', une lame d'aluminium d'épaisseur $0^{mm},3$. Si l'on recommençait les mêmes déterminations après avoir enlevé la lame d'aluminium de $0^{mm},11$ qui se trouvait auparavant sur le trajet des rayons secondaires, le coefficient de transformation, déterminé à l'aide de la même lame d'aluminium de $0^{mm},3$, s'élevait à 30 et le coefficient de transmission des rayons secondaires à travers la même lame s'abaissait à 0,028. Si l'on diminuait l'épaisseur d'air traversée par les rayons secondaires, c continuait à augmenter et γ à diminuer, c'est-à-dire que les premières épaisseurs d'air, d'aluminium, etc., traversées par les rayons secondaires arrêtent les rayons secondaires les plus transformés et les moins pénétrants. Les rayons X employés dans les expériences qui viennent d'être citées, étant reçus directement dans l'électroscope, présentaient un coefficient de transmission γ_X de 0,39 à travers la lame d'aluminium d'épaisseur $0^{mm},3$ déjà employée; pour avoir une idée de leur hétérogénéité, il convient de dire que ce coefficient de transmis-

sion à travers la même lame s'élevait à 0,52 lorsque le faisceau était déjà filtré par $0^{mm},17$ d'aluminium. L'hétérogénéité d'un faisceau secondaire n'est pas indépendante de celle du faisceau de rayons X excitateurs.

Parmi les rayons X d'un faisceau issu d'un tube focus, ceux qui interviennent le plus dans l'excitation secondaire sont les rayons relativement pénétrants que laisse passer une lame d'aluminium, par exemple : le coefficient Γ, défini par le rapport suivant lequel est réduite l'action électrique des rayons secondaires quand on filtre les rayons X par une certaine lame A est supérieur au coefficient de réduction de l'action électrique directe des rayons X dans les mêmes conditions, c'est-à-dire au coefficient de transmission γ_X de l'action électrique des rayons X à travers la même lame A. Ainsi dans l'exemple relatif au nickel, où l'on avait $\gamma_S = 0,028$, on avait $\Gamma = 0,9$ et $\gamma_X = 0,39$. Le fait que Γ est supérieur à γ_X se présente aussi bien pour les corps qui transforment beaucoup, comme le nickel dans l'exemple précédent, que pour ceux qui ne transforment pas notablement les rayons X. Dans le premier cas, au moins, on ne peut l'attribuer à ce qu'une partie des rayons X, qui seraient particulièrement pénétrants, seraient diffusés sans transformation, car, d'après les divers résultats obtenus, les rayons pénétrants ainsi diffusés devraient avoir une action électrique négligeable vis-à-vis de celle des rayons transformés.

Aux particularités précédentes, se rattache le fait suivant : dans la décharge d'un condensateur dont une armature M (*fig.* 16) frappée par les rayons X est formée d'un métal lourd, la part de l'effet des rayons secondaires dans la décharge du condensateur augmente si les rayons X incidents sont filtrés par une lame d'aluminium, par exemple. De même, dans les expériences radiographiques de la *fig.* 18, le renforcement de l'action, produit par les rayons secondaires de la lame MM sur la plaque *pp* impressionnée en même temps par les rayons X, est

d'autant plus visible que le verre de la plaque *pp* traversé par les rayons X avant la couche sensible est lui-même plus épais.

8. *Résultats relatifs à des corps divers.* — Les coefficients de transformation *c* obtenus pour différents corps dans les mêmes conditions, en particulier avec un même faisceau de rayons X et une même lame filtrante A, permettent de comparer les degrés de transformations des rayons secondaires que ces différents corps envoient dans l'électroscope. Les rayons secondaires reçus par l'électroscope sont dépouillés par l'air et les divers milieux traversés avant d'atteindre la face interne de l'électroscope, de leur partie la plus absorbable et la plus transformée, et cette absorption élective est surtout importante pour les rayons de métaux tels que le plomb, le platine. Aussi, quand les métaux comparés rayonnent à une distance suffisante dans l'air, les rayons du plomb et du platine reçus par l'électroscope sont-ils beaucoup moins transformés et plus pénétrants que ceux du zinc, du cuivre, par exemple. Mais quand on diminue graduellement l'épaisseur d'air traversée par les rayons, le platine envoie dans l'électroscope des rayons de moins en moins pénétrants dont le coefficient de transformation dépasse bientôt considérablement ceux du zinc, du cuivre. J'ai toujours constaté que, si un métal dépassait ainsi un autre métal, l'ordre de ces deux métaux ne changeait plus quand l'épaisseur d'air traversée diminuait encore, ni quand on remplaçait la feuille d'aluminium battu *a'b'* (*fig.* 14 *bis*) par une toile métallique.

J'ai ainsi trouvé pour un certain nombre de métaux un *ordre limite* des coefficients de transformation décroissants, pour des épaisseurs d'air de plus en plus petites traversées par les rayons secondaires. Pour les métaux étudiés, cet ordre limite coïncide avec l'ordre limite des activités électriques décroissantes (*cf.* § 4 de ce Chapitre). C'est à la fois l'ordre limite des pouvoirs de pénétration crois-

sants et des coefficients de transformation décroissants; ainsi quand on emploie la méthode du condensateur (*fig.* 16) et qu'on dispose sur l'armature MM une feuille mince d'aluminium on réduit beaucoup la vitesse de décharge du condensateur si l'armature MM est en platine ou en plomb, moins si elle est en fer ou nickel, et moins encore si elle est en zinc, en cuivre. Cela veut dire que les métaux qui transforment le plus émettent les rayons secondaires les plus absorbables et les plus actifs.

Les éléments qui transforment notablement les rayons X communiquent cette propriété aux mélanges ou aux composés qui en renferment sans que l'état physique ni l'état de combinaison paraissent influer notablement. Ainsi l'oxyde de cuivre CuO et l'oxyde de nickel NiO, à l'état pulvérulent, transforment les rayons X, moins toutefois que les métaux cuivre et nickel, ce qui peut s'expliquer par l'absorption que les rayons émis par le cuivre et le zinc éprouvent de la part de l'oxygène combiné au métal et relativement très peu actif. D'ailleurs le nickel, plus actif que le cuivre, communique à son oxyde un pouvoir de transformation et une activité plus grands que ceux de l'oxyde de cuivre. Il en résulte que l'activité d'un mélange ou d'un composé n'est pas en relation générale avec sa densité. Par exemple, l'azotate d'urane, grâce à l'uranium qu'il renferme, est bien plus actif que l'aluminium, et cependant sa densité 2,8 diffère peu de la densité 2,7 de l'aluminium. Les corps très légers sont, il est vrai, souvent très peu actifs et n'émettent que des rayons secondaires sensiblement aussi pénétrants que les rayons X générateurs. Mais cette remarque n'est vraie que pour des corps, comme la paraffine, qui renferment seulement dans leur composition des éléments très peu actifs; encore faut-il prendre garde à des traces d'impuretés très actives enfermées dans un corps par lui-même très peu actif tant qu'il est pur ([1]).

([1]) *Voir* ci-après : Chap. III, § 1.

La propriété d'*activité secondaire* se présente donc surtout comme une *qualité atomique* qui, pour les sept éléments ci-après, décroît dans l'ordre déjà indiqué :

	Pt	Sn	Ni	et Fe	Zn	Cu	Al
Poids atomique..	194	118	58,7	56,0	65	63,3	27
Densité.........	21,5	7,3	8,9	7,9	7,1	8,9	2,6

On voit que l'étain est plus actif que le fer et le cuivre, bien qu'étant plus léger; de même, le fer et le zinc passent avant le cuivre. D'autre part, le nickel et le fer sont nettement plus actifs que le zinc et le cuivre, qui ont des poids atomiques plus élevés. Mais le nickel et le fer, qui ont des propriétés chimiques voisines et sont considérés comme éléments *analogues*, ont des activités secondaires sensiblement égales.

CHAPITRE III.

CONSÉQUENCES DES PHÉNOMÈNES D'ÉMISSION SECONDAIRE.

1. Application à la Chimie. — 2. Influence de la position d'un écran sur sa transparence apparente pour les rayons X. — 3. Influence de l'ordre d'un système d'écrans sur le rayonnement secondaire et sur la transparence apparente du système pour les rayons X. — 4. Mécanisme de la décharge des conducteurs frappés par les rayons X.

1. *Application à la Chimie.* — L'ordre limite d'activité secondaire, que j'ai défini pour quelques éléments, permettra de faire une comparaison de l'ensemble des éléments chimiques d'après un nouveau caractère spécifique. Cette comparaison semble dès à présent dépendre, comme la *classification chimique* naturelle de J.-B. Dumas et de Mendeleef, des analogies chimiques aussi bien que de la grandeur du poids atomique.

L'activité électrique secondaire permet, d'autre part, de rechercher une petite proportion d'un élément assez actif disséminé dans un corps relativement peu actif par lui-

même. Ainsi, en comparant des échantillons d'aluminium de provenances diverses, j'ai trouvé que leurs activités secondaires observées dans les mêmes conditions étaient très différentes, dans le rapport de 1 à 2 et même de 1 à 6 lorsque le tube focus employé était assez *mou* et émettait des rayons X assez peu pénétrants; or les échantillons les plus actifs contenaient seulement 2 ou 3 pour 100 de métaux relativement très actifs (cuivre, fer) de plus que l'aluminium le moins actif. Des mesures successives permettent de déceler ainsi nettement 1 pour 100 de cuivre ajouté à un aluminium, et il est évident qu'on irait beaucoup plus loin en employant une méthode d'opposition ou si le métal recherché était plus actif que le cuivre [1]. En ce qui concerne l'aluminium, la grande importance des petites quantités de cuivre, fer, etc., qu'il peut renfermer rend impossible d'attribuer des valeurs précises aux diverses propriétés des rayons secondaires qu'il émet, tant que l'on ne possédera pas un échantillon très pur de ce métal. L'invariabilité de l'activité secondaire dans des conditions déterminées sera l'un des caractères à exiger d'un *corps pur*.

De là aussi une méthode pour rechercher de petites quantités d'un élément soit déjà bien connu, soit non encore isolé ou tout à fait nouveau, à la condition seulement que l'élément recherché soit notablement plus actif que le corps dans lequel il est disséminé. Cette méthode serait

---

[1] Il conviendra pour la recherche des éléments très lourds à rayons secondaires très absorbables par l'air de former, avec le corps où l'on recherche l'élément étranger, l'armature M d'un condensateur recevant un faisceau de rayons X (*fig.* 16). Il sera possible d'instituer une *méthode de zéro* en employant un second condensateur, semblable au premier, dont le corps à comparer à M formera l'armature M′ frappée par les rayons X; les armatures M et M′ seront reliées à l'aiguille d'un électromètre ou à la feuille d'or d'un électroscope de Hankel; les armatures opposées à M et M′ seront à des potentiels égaux et de signes contraires, de manière que les actions secondaires de M et M′ seront *opposées* l'une à l'autre sur l'électromètre.

analogue à la méthode remarquable qui a permis à M. et Mme Curie de découvrir de très petites quantités d'éléments nouveaux *spontanément* actifs, le polonium et le radium, dans les minerais d'urane et de thorium [1]. Elle serait généralement bien moins sensible; d'un autre côté, elle serait applicable à un plus grand nombre de cas, puisque la plupart des métaux lourds présentent un très notable pouvoir de transformation et une émission secondaire très active électriquement et très variable avec la nature chimique des éléments considérés.

2. *Influence de la position d'un écran sur sa transparence apparente pour les rayons* X. — Le coefficient de transmission que présente, pour les rayons X, une épaisseur déterminée d'un corps A doit être mesuré en plaçant le récepteur (particulièrement l'électroscope ou la plaque photographique) assez loin du corps A pour que les rayons secondaires postérieurs disséminés au delà de ce corps ne puissent pas atteindre le récepteur. Sans cette précaution, la mesure pourrait n'avoir aucun sens. Il ne faut pas oublier, en effet, que l'action électrique ou radiographique des rayons secondaires peut atteindre et dépasser celle des rayons X eux-mêmes; l'effet dû aux rayons secondaires postérieurs peut ainsi compenser, et même au delà, l'affaiblissement des rayons X par suite de l'absorption réelle, de manière que l'action des rayons X transmis peut sembler avoir augmenté par l'effet de la transmission. Voici un exemple :

Un faisceau de rayons X est reçu dans un électroscope à travers une mince feuille d'aluminium battu qui en ferme l'entrée. Une feuille de *zinc* de $\frac{1}{20}$ de millimètre

(1) M. Curie et Mme Curie, *Comptes rendus*, t. CXXVII, p. 175. M. Curie, Mme Curie et M. Bémont, *loc. cit.*, p. 1215; 1898. Un nouvel élément très actif, l'*actinium*, a été depuis découvert dans les mêmes minerais par M. Debierne : *Comptes rendus*, t. CXXIX, p. 593; 1899; t. CXXX, p. 906; 1900.

d'épaisseur, placée à 15^{cm} de la feuille d'aluminium sur le trajet des rayons X, transmet la fraction 0,75 de l'action électrique de ces rayons mesurée par l'inverse du temps nécessaire pour une décharge déterminée. Ce nombre représente le *coefficient de transmission vrai* de l'action électrique, tel qu'il résulte de l'affaiblissement par absorption des rayons X transmis en ligne droite à travers $\frac{1}{20}$ de millimètre de zinc; il ne change pas si l'électroscope est éloigné davantage de la feuille de zinc, c'est-à-dire que les rayons secondaires postérieurs, disséminés par la feuille de zinc, n'entrent pas en quantité notable dans l'électroscope. Mais si, au contraire, l'électroscope est rapproché de la feuille de zinc (¹), le coefficient de transmission apparente γ, mesuré par le rapport des inverses des deux temps de décharge obtenus en présence et en l'absence de la feuille de zinc, augmente d'abord très lentement, puis de plus en plus vite à mesure que la distance d de la feuille de zinc à la paroi d'aluminium mince de l'électroscope va en diminuant, comme le montrent les nombres suivants :

d.	15^{cm}.	$2^{cm},2$.	1^{cm}.	$0^{cm},5$.	$0^{cm},3$.	0.
γ	0.75	0,78	0,96	1,00	1,10	1,26

Ainsi, à la distance de 5^{mm}, l'interposition de la feuille de zinc ne produit pas d'absorption apparente des rayons X. A une distance plus faible, non seulement elle n'affaiblit pas l'action des rayons X, mais elle l'augmente : de $\frac{1}{10}$ de sa valeur à la distance de 3^{mm}, de $\frac{1}{4}$ de sa valeur quand la feuille de zinc forme la paroi de l'électroscope, la feuille mince d'aluminium $a'b'$ (*fig.* 16) étant alors supprimée (²).

(¹) Le dispositif est celui de la *fig.* 16; la fenêtre $a'b'$ de l'électroscope est de dimensions suffisantes pour recevoir toute la largeur du même faisceau de rayons dans toutes les positions prises par l'électroscope.

(²) Cette suppression n'augmente l'action secondaire du zinc seule que de $\frac{1}{10}$ environ de sa valeur.

Avec un faisceau de rayons X moins pénétrants, la variation du coefficient de transmission apparente avec la distance à l'électroscope est, toutes choses égales d'ailleurs, moins grande, et il peut devenir même impossible, avec un écran absorbant donné, d'augmenter l'action des rayons X par interposition de cet écran, si rapproché que l'électroscope soit de cet écran. Ainsi, avec la même feuille de zinc de $\frac{1}{20}$ de millimètre et un faisceau de rayons X assez absorbable pour que $\frac{1}{10}$ seulement de l'action électrique de ce faisceau fût transmise par cette feuille quand l'électroscope en était très éloigné, le coefficient de transmission apparente 0,10 s'élevait seulement à la valeur 0,13 quand la feuille de zinc formait la paroi de l'électroscope. Mais l'interposition d'une feuille d'or battu ($\frac{1}{10}$ de micron d'épaisseur) sur le trajet des rayons X contre une fine toile de laiton fermant l'entrée de l'électroscope augmentait l'action électrique de $\frac{1}{25}$ de sa valeur au lieu de la diminuer.

Cette influence de la distance est inégale d'un corps à un autre. L'absorption des rayons secondaires par l'air joue un rôle important quand le corps dont on étudie la transparence est une feuille d'un métal tel que l'or, le platine, qui transforme très profondément les rayons X. On s'en aperçoit en mettant en contact avec une feuille de platine, par exemple, une toile métallique fermant l'entrée de l'électroscope, puis éloignant progressivement cette toile de millimètre en millimètre derrière la feuille de platine; l'action due aux rayons secondaires de la feuille de platine diminue d'abord bien plus vite que celle des rayons secondaires d'une feuille de zinc.

L'influence de la position d'un écran sur sa transparence apparente s'observe bien aussi, quand on emploie comme récepteur une plaque photographique dont la couche sensible est nue du côté de l'écran étudié, surtout si les rayons X employés sont assez pénétrants.

Si l'écran étudié est une lame d'aluminium, d'ébonite de paraffine..., qui ne transforme pas notablement les rayons X, l'action électrique ou radiographique des rayons secondaires postérieurs de l'écran est, comme celle des rayons secondaires antérieurs, assez faible vis-à-vis de celle des rayons X incidents pour passer souvent inaperçue. C'est ce qui arrive pour les rayons tertiaires dans les expériences qui permettent d'étudier le coefficient de transformation et le degré de pénétration des rayons secondaires avec le dispositif de la *fig.* 14 *bis*, Chap. II, § 7 : un écran d'aluminium, d'ébonite, etc., est placé en A'A' à une distance de l'électroscope suffisante pour que ses rayons tertiaires postérieurs soient négligeables, ou bien en AA dans une position telle que ses rayons secondaires n'entrent pas dans l'électroscope et n'excitent sur la lame étudiée L que des rayons tertiaires négligeables.

Si le récepteur employé, au lieu d'un électroscope ou d'une plaque photographique, est un écran luminescent au platinocyanure de baryum, l'action des rayons secondaires postérieurs devient faible vis-à-vis de celle des rayons X, comme il arrive pour les rayons secondaires antérieurs, même si le corps étudié émet des rayons secondaires très transformés, comme le platine. Aussi le phénomène est-il bien plus difficile à voir, surtout si le corps étudié est un corps très transparent, à émission secondaire relativement peu active, comme la paraffine, l'ébonite, l'aluminium ([1]).

3. *Influence de l'ordre d'un système d'écrans sur le*

([1]) D'après cela, il ne faut pas s'étonner que l'influence de la distance d'une lame d'aluminium à un écran luminescent au platinocyanure de baryum ait paru au professeur Röntgen sans influence appréciable sur la transparence apparente de cette lame (RÖNTGEN, 3e Mémoire, *Wied. Annalen d. Physik*, t. LXIV, p. 18; 1898).

rayonnement secondaire et sur la transparence apparente du système pour les rayons X. — Avec le dispositif de la *fig.* 14 (p. 65), une lame LL étant disposée suivant *eh* de manière à envoyer dans l'électroscope C des rayons secondaires postérieurs, on peut répéter l'expérience, qui démontre la transformation des rayons et définir un coefficient de transformation : une lame d'aluminium, d'ébonite ou de paraffine, placée en A′A′, affaiblit l'action des rayons postérieurs du zinc, par exemple, plus que si elle est placée en AA sur le trajet des rayons X incidents.

Une conséquence plus frappante de la transformation peut être donnée ici : on applique la lame A contre la lame L disposée en *eh*, d'abord en plaçant A en avant de L vers le tube focus, puis en arrière vers l'électroscope; cela revient à étudier l'émission secondaire postérieure du système des deux lames disposées d'abord dans l'ordre AL, puis dans l'ordre LA. On constate que le système émet des rayons secondaires plus actifs quand il est traversé par les rayons X dans l'ordre AL que s'il est traversé dans l'ordre inverse LA; dans l'ordre LA, la lame A affaiblit beaucoup les rayons secondaires postérieurs de L, qui sont les plus actifs; les rayons secondaires postérieurs de la lame A supposée en aluminium, ébonite ou paraffine, par exemple, sont relativement très faibles; aussi l'influence de l'ordre d'un système d'écrans, tels que aluminium et fer, aluminium et zinc, sur l'émission secondaire postérieure du système, est-elle très grande et peu différente de celle qu'on observait en disposant la lame d'aluminium en AA, puis en A′A′. Si les deux lames A et L transforment toutes deux notablement les rayons X, mais émettent des rayons secondaires inégalement pénétrants, l'ordre des deux lames peut influer encore sur l'émission secondaire postérieure du système.

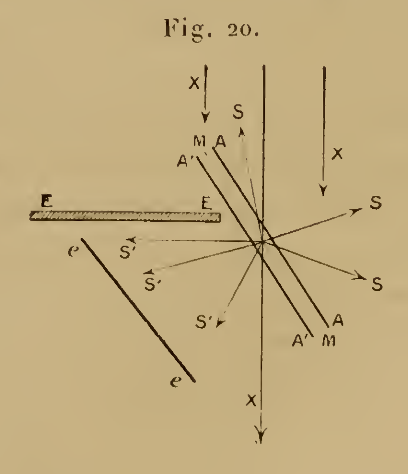
Soit maintenant l'électroscope déplacé de manière à recevoir directement le faisceau des rayons X transmis en

ligne droite à travers un système de deux lames A, L de matières différentes; il reçoit en même temps des rayons secondaires postérieurs émis par ce système; l'activité de ces rayons secondaires dépend, en général, à la fois de la distance de l'électroscope au système et de l'ordre des écrans du système; on doit donc observer une influence de l'ordre des écrans A, L sur la transparence apparente du système AL et cette influence doit être d'autant plus importante que la distance entre le système AL et l'électroscope est elle-même plus faible. Voici, par exemple, un résultat obtenu avec le système formé d'une lame L de zinc de $\frac{1}{20}$ de millimètre et une lame A d'aluminium de $0^{mm},55$: le faisceau de rayons X était le faisceau déjà employé pour étudier l'influece de la position de la même feuille de zinc sur sa transparence apparente; son action sur l'électroscope était réduite au $\frac{1}{10}$ de sa valeur quand il traversait la feuille de zinc, assez éloignée de l'électroscope pour ne pas lui envoyer de rayons secondaires. La double lame AL fermant l'électroscope, l'action de décharge observée quand le zinc formait la paroi interne de l'électroscope (ordre AL) était 1,73 fois aussi grande que lorsqu'il formait la paroi externe (ordre LA). Une feuille d'aluminum battu d'épaisseur voisine du micron était mise à la place de la double lame AL pour fermer l'entrée de l'électroscope; ceci ne modifiait pas l'action dans le cas de l'ordre LA et l'affaiblissait seulement d'environ $\frac{1}{20}$ dans le cas de l'ordre AL. L'électroscope était alors éloigné de manière à augmenter graduellement la distance d entre la feuille d'aluminium battu de sa fenêtre et la double lame; le rapport 1,73 s'abaissait à 1,4 pour $d = 2^{mm}$, à 1,2 pour $d = 25^{mm}$, à 1,1 pour $d = 55^{mm}$. Dans cette expérience, la lame A d'aluminium de $0^{mm},55$ arrêtait la plus grande partie de l'action électrique des rayons secondaires postérieurs du zinc sans rayonner beaucoup elle-même. Avec une lame d'aluminium plus mince ($0^{mm},11$) associée à la

même feuille de zinc, le rapport des coefficients de transmission apparente des systèmes AL et LA, observés quand ces systèmes formaient la paroi de l'électroscope, s'abaissait de 1,7 à 1,4.

L'influence de l'ordre d'un système d'écrans sur l'émission secondaire du système s'observe aussi très bien en recevant les rayons secondaires postérieurs S' sur une plaque photographique ou bien sur un écran au platinocyanure de baryum disposé en *ee* (*fig.* 20) et protégé par

Fig. 20.

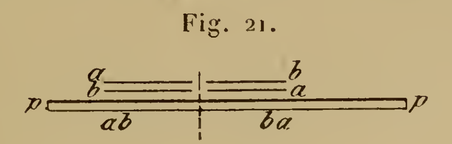


un écran de plomb EE contre l'action directe des rayons X. Si MM est une feuille de zinc, par exemple, l'impression radiographique, ou la luminescence de l'écran, sont nettement plus vives lorsqu'une lame d'aluminium est disposée en A'A' que si elle est disposée en AA; un dispositif photométrique permettant la comparaison des deux actions simultanées n'est pas nécessaire pour apercevoir le phénomène.

Si les rayons X agissent en même temps que les rayons secondaires postérieurs, l'influence de l'ordre des deux lames sur la transparence apparente du système se voit encore facilement en disposant sur la couche sensible *nue* d'une plaque photographique *pp* (*fig.* 21) un système de deux feuilles (*a*, *b*) et à côté un système (*b*, *a*) identique, mais d'ordre inverse; les plages contiguës *ab* et *ba* de la

plaque sensible sont inégalement impressionnées par une source de rayons X située au-dessus de *pp* dans le plan perpendiculaire à *pp* qui sépare les deux plages. Le système (zinc-papier noir), par exemple, paraît nettement plus opaque que le système (papier noir-zinc). L'influence de l'ordre des écrans ne disparaît pas sous une feuille d'aluminium battue placée entre la couche sensible *pp* et les systèmes *ab*, *ba*; mais elle est atténuée, comme on s'en assure

Fig. 21.



en comparant la partie de *pp* recouverte sous les deux systèmes par la feuille d'aluminium et la partie non recouverte; l'influence de l'ordre des écrans diminue de plus en plus à mesure que l'épaisseur de la feuille d'aluminium interposée augmente. Mais l'influence de l'ordre des écrans sur la transparence apparente est moins nette quand la plaque photographique est remplacée par un écran au platinocyanure de baryum derrière lequel on applique les systèmes étudiés *ba* et *ab*. L'action des rayons secondaires est alors presque noyée dans l'action des rayons X, comme il a été déjà dit au sujet de l'influence de la distance d'un écran sur sa transparence apparence (¹).

(¹) Depuis que j'ai signalé l'influence de l'ordre d'un système d'écrans sur la transparence apparente du système pour les rayons X (*Comptes rendus* du 26 juillet 1897, t. CXXV, p. 230, et du 7 février 1898, t. CXXVI, p. 467), le professeur Roïti en a fait une étude qualitative au moyen d'un écran au platinocyanure de baryum (*Rendiconti d. R. Acc. dei Lincei* du 20 février 1898, t. VII, p. 89). L'expression de *cryptoluminescence*, employée à cette occasion par l'auteur pour désigner les phénomènes de transformation des rayons X, ne me paraît pas bien choisie; le mot équivalent et plus simple de *radioluminescence* doit s'appliquer seulement à la transformation des rayons X en *lumière*, d'après une extension immédiate de la nomenclature adoptée par le professeur E. Wiedemann, de même que le mot de *photoluminescence* s'applique aux phénomènes de transformation de rayons lumineux en d'autres rayons lumineux.

4. *Mécanisme de la décharge des conducteurs frappés par les rayons* X. — L'action des rayons X sur les corps électrisés, connue mais non publiée tout d'abord par le professeur Röntgen ([1]), a été découverte presque simultanément par MM. Benoist et Hurmuzescu ([2]) à Paris, H. Dufour à Lausanne ([3]), A. Righi à Bologne ([4]), J.-J. Thomson à Cambridge ([5]). Le fait fondamental est que les conducteurs positifs ou négatifs sont déchargés avec la même vitesse sous l'influence des rayons X qui les frappent, tandis que l'électricité négative seule est dissipée par la lumière ultra-violette. Dans un même gaz, la vitesse de la décharge augmente en même temps que la pression du gaz, et elle dépend de la nature du gaz [Benoist et Hurmuzescu ([6]), J.-J. Thomson]. MM. Benoist et Hurmuzescu ([7]) ont encore montré que la vitesse de décharge d'un conducteur frappé par les rayons X dépend de la nature du métal qui forme le conducteur. Les professeurs J.-J. Thomson et Röntgen ont reconnu que l'air traversé par les rayons X est devenu conducteur de l'électricité et conserve cette propriété pendant un instant; on peut décharger un conducteur en amenant sur lui de l'air ainsi *röntgenisé*, ou, comme on dit maintenant, *ionisé*. Il résulte des recherches des professeurs Righi ([8]), Villari ([9]), J.-J. Thomson ([9])

([1]) *Voir* Röntgen, Deuxième Mémoire, *Sitzungsb. d. Würzburger phys. med. Gesell.;* mars 1896; *Wied. Annalen d. Physik.*, t. LXIV, p. 11; 1898; *Journ. d. Phys.*, 3e série, t. V, p. 189; 1896.

([2]) *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 235; 1896.

([3]) *Archives des Sc. phys. et nat. de Genève*, 4e période, t. I, p. 111.

([4]) *Rendiconti della R. Acc. di Bologna*, février 1896.

([5]) *Proced. Royal Soc.*, t. LIX, p. 274; 1896.

([6]) *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 926; 1896.

([7]) *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 779; 1896.

([8]) Les expériences faites à ce sujet par le professeur A. Righi présentent une grande analogie avec celles qu'il avait réalisées quelques années auparavant au sujet de la décharge par les rayons ultra-violets (*Atti della R. Accad. di Bologna;* 1888, 1889, 1890, 1891).

([9]) Le professeur Villari (*Comptes rendus*, t. CXXIII, p. 428) crut

que la décharge d'un conducteur peut avoir lieu sans qu'il soit touché par le faisceau rectiligne de rayons X et que les charges électriques libérées par les rayons X se déplacent le long des lignes de force du champ électrique. M. J. Perrin a montré nettement que, si les rayons X traversent des tubes de force électrique réunissant deux conducteurs dans un gaz en repos, les tubes de force rencontrés dans ce gaz par les rayons deviennent conducteurs de l'électricité. Il a isolé et étudié ce phénomène fondamental en faisant passer un faisceau de rayons X entre les armatures d'un condensateur formé de deux plaques métalliques; le condensateur se décharge, bien que les armatures ne soient point touchées par le faisceau (¹). On peut dire avec M. J. Perrin : « Là où des rayons X traversent un gaz, apparaissent des charges égales et contraires (*ionisation*); puis ces charges se meuvent sous l'influence du champ le long des tubes de force qui les contiennent jusqu'à ce qu'elles rencontrent un conducteur qu'elles déchargent, ou un isolant solide ou liquide qu'elles chargent (²). » Ce dernier mode de décharge isole un phénomène indépendant de la nature des métaux des conducteurs mais dépendant de la nature et de la pression du gaz qui les sépare; d'où le nom d'*effet gaz* que lui a donné M. J. Perrin.

Après avoir ainsi dégagé un phénomène fondamental, M. J. Perrin a cherché à expliquer le rôle des surfaces

---

pouvoir admettre que les rayons X s'incurvaient fortement; cette interprétation est en contradiction avec les faits.

Le professeur J.-J. Thomson annonça que tout gaz devient conducteur à la manière d'un électrolyte. C'est dans son laboratoire que furent faites plus tard les principales expériences relatives à l'*ionisation des gaz* par les rayons X.

(¹) J. Perrin, *L'Éclairage électrique*, t. VII, p. 545; 20 juin 1896; *Ann. de Ch. et de Phys.* (7), t. XI, p. 523; 1897.

(²) *Thèse de Doctorat*. p. 58; ou *Ann. de Ch. et de Phys., loc. cit.*, p. 553.

conductrices frappées par les rayons X. Il appelle *effet métal* ce qu'il faut ajouter à l'effet gaz produit par les rayons X incidents, pour avoir l'effet total de la décharge [1], et il imagine le mécanisme suivant pour expliquer les résultats de ses expériences :

« En tous les points qu'atteignent des rayons Röntgen dans la surface de séparation d'un gaz et d'un métal se forment des quantités égales d'électricité positive et négative ou, d'une manière abrégée, une *ionisation superficielle* se produit en ces points. S'il existe un champ électrique, les charges d'un certain signe sont aussitôt absorbées par le métal, et les charges de signe contraire s'éloignent de ce métal en décrivant les lignes de force aux extrémités desquelles elles se trouvaient d'abord [2]. » Puis il définit des *coefficients d'ionisation superficielle*, qui « formeraient une classe de constantes qu'on pourrait comparer, à certains égards, aux tensions superficielles ou aux différences de potentiel par contact ». Mes expériences conduisent à changer cette explication :

Dans les expériences de la *fig.* 14 (p. 65), la décharge de la feuille d'or f a lieu sous l'influence des rayons secondaires du corps LL, métallique ou non, sans que les rayons X pénètrent dans la cage C de l'électroscope aux parois de laquelle est limité le champ électrique de la feuille d'or f. *Cette expérience isole une action propre du corps* LL, *et cette action a lieu à distance.*

Supprimons maintenant la feuille d'aluminium battu $a'b'$ qui fermait le champ électrique de f du côté de LL (*fig.* 14) et plaçons une lame d'aluminium AA (*fig* 22) entre

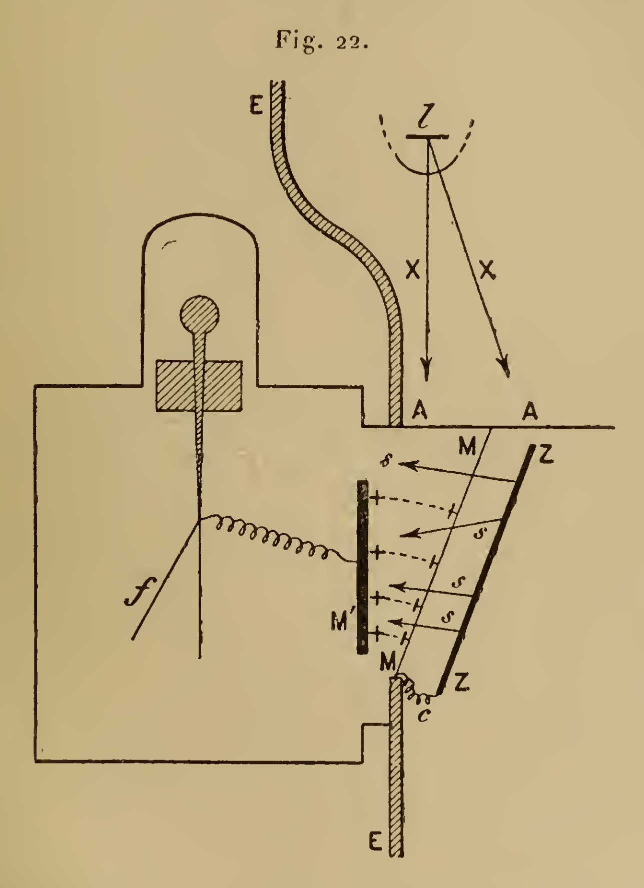
---

(1) J. Perrin, *Thèse de Doctorat*, p. 48; ou *Ann. de Ch. et de Phys., loc. cit.*, p. 542. (*Journal de Phys.*, t. VI, p. 426.)

(2) J. Perrin, *Thèse de Doctorat*, p. 52; ou *Ann. de Ch. et de Phys., loc. cit.*, p. 547. *Théorie de l'effet métal, ionisation superficielle* (*Journal de Phys.*, t. VI, p. 430); *voir* aussi *Comptes rendus*, t. CXXIV, p. 455; 1er mars 1897. *Décharge par les rayons Röntgen. Rôle des surfaces frappées.*

le tube focus l et la lame métallique MM réduite aux dimensions de l'ouverture de l'écran EE, de manière à prolonger la cage de l'électroscope jusqu'à l'espace compris entre AA et MM. Des lignes de force sont maintenant échangées entre la feuille d'or f et le métal MM. Les rayons X agissent à la fois sur l'air que traversent ces lignes de force dans l'espace compris entre AA et MM

Fig. 22.



(*effet primaire*), et en frappant le métal MM maintenant placé dans le champ électrique (*effet secondaire*).

Le second effet est ici bien plus considérable que le premier si MM est une lame d'un métal lourd. Disposons, en effet, une nouvelle feuille d'aluminium à la place de la feuille de métal lourd MM; la faible action de décharge que nous observons alors correspond assez exactement à l'effet primaire; elle lui est même un peu supérieure

à cause de l'action propre de l'aluminium et des rayons secondaires envoyés par l'air placé derrière. Nous pouvons rendre l'effet primaire beaucoup plus intense en reliant électriquement à la feuille d'or f une plaque métallique M′ (*fig.* 22) isolée électriquement et assez rapprochée de MM pour échanger avec MM de nombreuses lignes de force; l'effet primaire peut atteindre alors l'effet secondaire ([1]), c'est-à-dire que l'effet obtenu en plaçant le métal lourd en MM étant représenté par 2, l'effet obtenu quand MM est une feuille d'aluminium est voisin de 1.

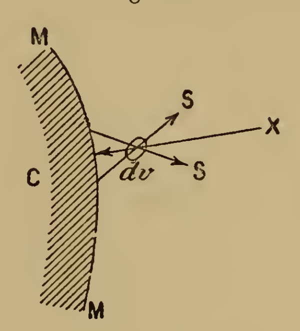
Quelle que soit la grandeur de l'effet primaire, supposons-nous d'abord dans le cas où cet effet se produit presque seul. MM est alors une feuille d'aluminium battu d'une épaisseur de l'ordre du micron. Au-dessous de cette feuille mince MM disposons parallèlement à MM une lame ZZ d'un métal lourd, tel que le zinc, qui reçoive les rayons X transmis à travers MM. La rapidité de la décharge augmente aussitôt. Rapprochons la lame ZZ de MM parallelement à elle-même; la rapidité de la décharge augmente graduellement. L'action est maximum quand la lame ZZ est appliquée contre la feuille mince d'aluminium MM. Enlevons enfin cette feuille d'aluminium de manière que la lame ZZ remplace maintenant l'armature MM du condensateur (M, M′). L'effet secondaire seul augmente de $\frac{1}{10}$, par exemple, de sa valeur dans le cas du zinc, du cuivre, quand on met ainsi le métal lourd à nu. La plus grande partie au moins de l'*effet secondaire* de tels métaux est donc due à une action à distance, au rayonnement secondaire émané de ces métaux.

J'ai vérifié que les rayons secondaires rendent l'air con-

([1]) Les rayons X ne rencontrent pas M′. Plus ils en passent loin, plus l'effet primaire est faible. Ici encore on peut rendre l'effet primaire notablement plus faible que l'effet secondaire de MM en faisant tomber les rayons X sur M sous une incidence assez rasante et de manière que tout le faisceau de rayons X rencontre la surface MM.

ducteur de l'électricité, comme les rayons X, et peuvent décharger une surface métallique, comme dans les expériences de M. J. Perrin, sans rencontrer ni cette surface ni les surfaces avec lesquelles la première échange des lignes de force. De là l'explication suivante de la décharge d'un conducteur C (*fig.* 23) frappé par les

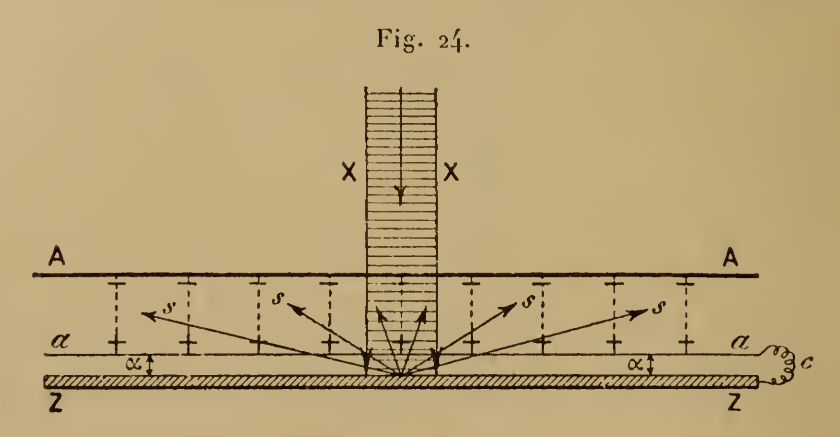
Fig. 23.



rayons X : chaque élément de volume dv de l'atmosphère adjacente au conducteur C est traversé à la fois par les rayons X incidents, par les rayons secondaires S, que le métal M émet sous l'influence des rayons X; si un autre conducteur C′ se trouve assez rapproché de C, l'élément de volume dv peut être traversé aussi par des rayons secondaires émanés du conducteur C′, ou même par les rayons tertiaires T, qui proviennent de chacun des conducteurs sous l'influence des rayons secondaires de l'autre; en toute rigueur, il faut encore tenir compte des rayons disséminés envoyés dans l'élément dv par le reste de la masse du gaz. La conductibilité du gaz est produite dans chaque élément de volume dv du gaz sous l'influence de tous les rayons qui traversent cet élément; il y a lieu de supposer, comme on le fait pour les rayons X, que les rayons secondaires ou tertiaires agissent en libérant dans chaque élément de volume dv d'égales quantités d'électricité positive et négative que le champ électrique entraîne respectivement en sens opposés jusque sur les conducteurs électrisés négativement ou positivement.

On peut se demander si les effets *secondaires* ou *tertiaires*, évidemment nécessaires pour expliquer le mécanisme de la décharge, y suffisent complètement. L'expérience montre que l'effet secondaire électrique accompagne la production des rayons secondaires, leurs actions sur les plaques photographiques et sur les écrans luminescents. Au lieu du dispositif de la *fig.* 22 on peut employer celui de la *fig.* 24 et obtenir des résultats ana-

Fig. 24.



logues : un faisceau de rayons X traverse normalement les deux armatures d'aluminium AA et *aa* d'un condensateur plan ; on approche derrière *aa* une lame ZZ d'un métal lourd relié au sol comme *aa*; on constate que la vitesse de décharge de l'armature AA [1] augmente aussitôt. Quand ZZ touche *aa*, si l'on supprime cette feuille d'aluminium *aa*, d'épaisseur de l'ordre du micron, on voit ici encore augmenter l'effet secondaire. Cette augmentation s'explique suffisamment par l'*absorption* des rayons secondaires de ZZ dans l'aluminium : elle est de l'ordre de $\frac{1}{10}$ avec le zinc et le cuivre; or nous avons vu

---

[1] Il peut être commode d'étudier la vitesse de décharge de *aa* ; dans ce cas AA est mise au sol et le potentiel de *aa* doit être assez élevé pour qu'on puisse négliger l'effet de décharge produit par les rayons de ZZ dans la couche d'air comprise entre *aa* et ZZ, sous l'influence de la force électromotrice entre les métaux *aa* et ZZ, liés par le fil mélique *c*.

que l'action radiographique de ces métaux placés contre la couche de gélatinobromure (*fig.* 17 et 18, Chap. II, § 6) était légèrement affaiblie par l'interposition d'une feuille d'aluminium de l'ordre du micron.

L'affaiblissement de l'effet secondaire électrique et celui de l'action radiographique, dans ces conditions, varient parallèlement; ils deviennent tous deux plus importants quand on passe du cuivre au zinc, au fer et au nickel, à l'étain, au platine et au plomb; pour ces deux derniers métaux, une épaisseur d'aluminium de l'ordre du micron arrête environ la moitié de l'effet secondaire électrique (résultat déjà indiqué au Chap. II, § 6); nous avons vu justement que la même épaisseur d'aluminium arrête une grande partie de l'action radiographique des rayons secondaires des mêmes métaux (*loc. cit.*).

D'autre part, quand le métal ZZ, recouvert de la mince feuille d'aluminium *aa*, est éloigné derrière cette feuille, les rayons secondaires, avant d'agir sur l'air du champ électrique compris entre AA et *aa*, doivent traverser la couche d'air d'épaisseur α comprise entre *aa* et ZZ; or, l'effet secondaire électrique s'affaiblit dans ces conditions, comme on pouvait s'y attendre, d'après l'influence géométrique de la distance et l'absorption par l'air; la première influence est assez faible avec le dispositif de la *fig.* 24, il y a peu de rayons secondaires qui n'entrent pas dans le condensateur quand l'épaisseur α est, par exemple, de 1^{mm}, le diamètre des armatures AA et *aa* étant de plusieurs centimètres; or, dans ces conditions, l'effet secondaire du cuivre, par exemple, s'affaiblit à peine, tandis que celui du platine diminue d'une fraction notable de sa valeur; nous avons vu justement que les rayons du platine sont fortement absorbés par l'air (Chap. II, § 5 et 6). D'une manière générale, il n'est pas nécessaire, même pour les métaux très lourds comme l'or, le platine, le plomb, d'admettre qu'une partie notable de l'effet du métal soit due à un phénomène superficiel. Je montrerai

plus tard (Chap. IV, § 5) que la surface d'un métal est le siège d'un phénomène électrique, mais lié à l'*émission* des rayons secondaires, essentiellement différent de l'ionisation superficielle imaginée par M. J. Perrin et qui ne saurait produire un effet *superficiel* de décharge appréciable tant que l'air n'est pas extrêmement raréfié.

Conformément à ce qui précède, l'action d'un métal dans la décharge n'est pas uniquement définie, comme le pensait M. J. Perrin, par la nature du métal, la nature et la pression du gaz ambiant, l'intensité du champ électrique, la forme et l'étendue de la surface métallique. Elle dépend de l'épaisseur du métal et augmente avec cette épaisseur (*cf.* Chap. II, § 2 et 6). Elle augmente avec le volume du gaz soumis à l'action électrique des rayons secondaires. M. J. Perrin a reconnu lui-même, conformément à mon explication, que l'effet dû au métal dans la décharge d'un condensateur augmente quand on augmente la distance des armatures [1]; il faut toutefois prendre garde que la signification de l'effet observé est extrêmement complexe et ne saurait servir à étudier l'absorption des rayons secondaires par l'air :

1° Les rayons secondaires émis par une armature MM d'un métal lourd (*fig.* 26) qui reçoit les rayons X à travers une armature d'aluminium AA, sont en partie émis latéralement en dehors du condensateur et traversent de l'air soumis à un champ électrique notablement inférieur à celui qui règne entre les deux armatures. Or, l'action de décharge varie dans le même sens que la valeur du champ électrique. Les rayons secondaires latéraux sont donc mal utilisés et la proportion de ces rayons est d'autant plus importante que l'armature MM est plus éloignée de AA [2].

---

[1] J. Perrin, *Comptes rendus*, t. CXXVI; 17 janvier 1898.

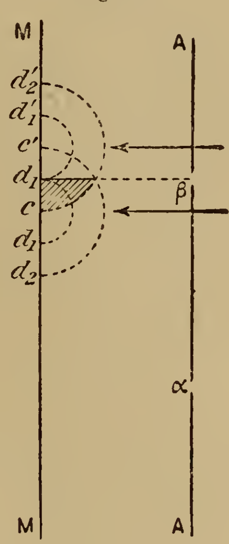
[2] Cela est vrai *a fortiori* quand l'armature AA est formée d'un disque $\alpha\beta$ communiquant seul avec l'électromètre et entouré d'un anneau de garde (*fig.* 25); les rayons cessent d'avoir toute action dès qu'ils

2° Une partie de l'action du métal M est due à ce que les rayons secondaires envoyés par M sur AA y donnent quelques rayons tertiaires dont l'action électrique est, elle aussi, d'autant plus faible que la source des rayons secondaires est plus éloignée de AA. Cette influence des rayons tertiaires n'est toutefois notable que pour un condensateur dont les armatures sont seulement distantes de quelques millimètres, par exemple.

---

sortent du volume d'air compris entre les deux armatures et limité à la surface du cylindre de base $\alpha\beta$. C'est ce qui arrive dans l'expérience décrite page 51 du Mémoire de M. J. Perrin [*Ann. de Chim. et de Phys.* (7), t. XI, p. 545] : le déplacement d'un pinceau de rayons X de c en c' (flèches de la *fig.* 25) transporte le centre d'émission des rayons

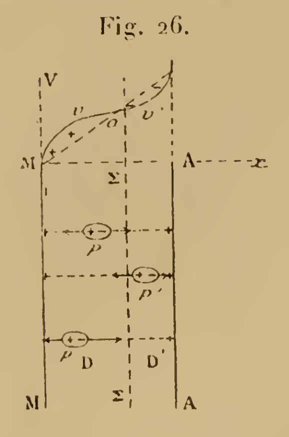
Fig. 25.



secondaires en dehors du champ électrique utile; ce sont alors seulement certains rayons secondaires inclinés sur MM qui sont utilisés; l'action des rayons secondaires issus de cc' sur l'air de l'hémisphère $c'd_1d'_1$ est inutilisée; de même, dans l'hémisphère de rayon $c'c$, l'action n'est utile que dans la partie hachurée; on s'explique ainsi que les armatures AA, MM étant distantes de 2^{cm}, la majeure partie de l'action du métal MM frappé par un pinceau étroit de rayons X disparaisse quand ce pinceau (flèches de la *fig.* 25) subit un déplacement latéral cc' d'au moins 5^{mm}; cela est surtout vrai si le métal M émet des rayons secondaires dont l'action électrique est très affaiblie par quelques millimètres d'air, et c'est justement le cas du plomb qui forme l'armature MM dans cette expérience de M. J. Perrin. Les influences signalées ci-après interviennent aussi dans cette expérience.

3° Sous l'influence des rayons X, le champ électrique cesse d'être uniforme dans toute l'épaisseur du condensateur et se localise principalement au voisinage des armatures. M. Child, qui a découvert ce phénomène [1], a observé que, par exemple, avec un condensateur dont les armatures étaient à une différence de potentiel de 120 volts et distantes de 60^{mm}, il existait, dans une couche d'air d'environ 3^{mm} au voisinage de chaque armature, un champ correspondant à un gradient d'environ 100 volts par centimètre, tandis que le champ était environ dix fois plus petit en moyenne dans les 54^{mm} d'air restant. L'action de décharge augmentant avec le champ, on comprend que l'effet dû aux rayons secondaires soit, indépendamment

Fig. 26.



de l'absorption par l'air, plus grand dans les premières couches d'air au voisinage du métal. L'ensemble de ces circonstances permet de comprendre que l'action due au métal M augmente seulement d'une fraction de sa valeur, comme l'a observé M. J. Perrin, quand la distance des

---

(1) CHILD, *Ueber die Potentialgradienten an Metalelectroden bei der Entladung durch X-Strahen* (*Wied. Annalen d. Physik*, t. LXV, p. 152, et aussi *The Phys. Rev.*, t. V, p. 193; 1897). Le phénomène a été étudié depuis par ZELENY (*Phil. Mag.*, 5e série, t. XLVI, p. 120; juillet 1898). Je ne connaissais pas encore ce dernier Mémoire lorsque j'ai donné aux *Comptes rendus* du 4 juillet 1898 l'explication du phénomène telle que je l'expose ici et qui est tout à fait d'accord avec la théorie détaillée de M. Zeleny.

deux armatures MM et AA augmente de 1^{mm} à 10^{mm}, avec un métal comme le zinc.

Quant aux phénomènes observés par Child, ils s'expliquent bien comme il suit : à travers chaque surface de niveau Σ du champ électrique (*fig.* 26) il passe un double flux d'électricité, savoir : 1° un flux négatif formé de charges négatives que les rayons ont libérées dans la couche d'air comprise entre Σ et l'armature négative MM et que le champ électrique entraîne vers AA; 2° un flux positif formé de toutes les charges positives libérées dans la couche d'air comprise entre Σ et AA. Ces flux d'électricité se déplacent avec des vitesses finies de l'ordre de quelques centimètres par seconde ([1]). Ne considérons d'abord que l'action des rayons X. Si la surface Σ est plus rapprochée de l'armature positive AA que de l'armature négative MM, le flux positif qui traverse Σ émane d'une couche d'air ΣA plus mince que la couche d'air ΣM, d'où émanent les charges négatives; il y a alors prédominance du flux négatif, c'est-à-dire qu'il y a en Σ un excédent d'électricité négative libre en mouvement, par suite une diminution du potentiel. Près de l'armature négative MM, au contraire, il y a prédominance de flux positif et augmentation du potentiel. Si la différence de potentiel des armatures est maintenue invariable, la chute de potentiel est donc localisée près des armatures; le gradient du potentiel, qui était représenté par la ligne droite M*o* avant l'action des rayons X, devient, quand les rayons X agissent, une ligne courbe infléchie telle que M*vov'*. Le régime permanent une fois établi, la densité cubique de l'électricité libre est constante sur chaque surface de niveau Σ, et elle est d'autant plus grande en valeur absolue que la surface Σ est

([1]) *Voir* Chap. IV, § 2. La vitesse du flux purement négatif produit par la lumière ultra-violette est ordinairement du même ordre dans les mêmes conditions, c'est-à-dire dans un champ de quelques volts par centimètre (*cf.* H. BUISSON, *Comptes rendus* du 25 juillet 1898).

plus rapprochée de l'une ou l'autre des deux armatures. Elle sera nulle sur la surface équidistante des deux armatures si les charges positive et négative se déplacent avec la même vitesse, et le potentiel y aura la même valeur que si les rayons X n'agissaient pas. En réalité, M. Child a observé que la surface de niveau sur laquelle le potentiel demeure inaltéré par le passage des rayons X est un peu plus éloignée de l'armature négative MM que de l'armature positive AA, comme le montre la *fig.* 26. Cela s'explique bien si l'on admet que les charges négatives se déplacent dans l'air un peu plus vite que les charges positives.

Si les rayons X pénètrent normalement à travers l'armature d'aluminium AA et frappent l'armature MM formée d'un métal lourd, les rayons secondaires du métal M interviennent et accélèrent la vitesse de décharge du condensateur. Leur action est plus importante dans les couches d'air voisines de MM que dans les couches d'air voisines de AA, où les rayons secondaires arrivent affaiblis par l'influence de la distance et de l'absorption par l'air; les charges positives libérées dans l'air près de MM, par les rayons secondaires de MM, sont entraînées aussitôt vers MM; les charges négatives sont entraînées à droite et agissent sur un parcours plus long, en sorte que l'effet qui domine est la diminution de l'excédent des charges positives libres près de MM. En effet, M. Child a observé que l'altération du gradient près de l'armature MM frappée par les rayons X est plus faible si cette armature est formée d'un métal lourd que si elle est en aluminium, et d'autant plus que le métal absorbe davantage les rayons X, ce qui justement correspond, pour les métaux étudiés par M. Child, à une émission secondaire dont l'action est plus grande et plus localisée près de l'armature MM.

Tout ce qui précède est relatif à la décharge d'une lame métallique frappée par les rayons X du côté de sa face électrisée. Si la lame n'est pas assez épaisse pour arrêter les rayons X et qu'elle soit frappée par l'autre face, les

rayons secondaires postérieurs la déchargent en même temps que les rayons X transmis. C'est ce qui arrive, par exemple, dans les expériences signalées déjà au sujet de l'influence des rayons secondaires postérieurs sur la transparence apparente d'une lame formant, par exemple, la paroi, reliée au sol, d'un électroscope (Chap. III, § 2), et au sujet de l'influence de l'ordre d'un système de deux lames, formant ou non la paroi d'un électroscope, sur la transparence apparente du système (Chap. III, § 3). Des phénomènes de même espèce ont été retrouvés par le professeur A. Winkelmann [1].

Parmi les divers caractères de l'effet secondaire électrique, il importe de signaler le fait qu'il peut atteindre et même dépasser l'effet primaire, dû aux rayons X, quand ils agissent sur un condensateur dont on rapproche suffisamment les armatures. On comprend, en effet, que l'effet des rayons secondaires, plus important dans les premières couches d'air voisines du métal rayonnant, diminue avec l'épaisseur de la lame d'air du condensateur bien moins vite que l'effet primaire. D'autre part, les rayons secondaires d'un métal lourd étant beaucoup plus absorbés par l'air que ne le sont les rayons X incidents, on comprend que la conductibilité de l'air provoquée par les rayons secondaires puisse être plus importante que celle que provoquent les rayons X, bien que les rayons secondaires émis par une mince couche superficielle ne doivent représenter qu'une petite partie de l'énergie des rayons X incidents; on peut dire qu'il y a une sorte de compensation entre la petitesse de la couche d'émission des rayons secondaires très transformés et leur faible pouvoir de pénétration, qui en est précisément la conséquence. La même remarque s'applique aux actions radiographiques, qui utilisent surtout les rayons les plus absorbables et

---

[1] A. WINKELMANN, *Wied. Annalen d. Physik*, t. LXVI, p. 1; 1898. Mémoire analysé dans *l'Éclairage électrique*, t. XXI, p. 349; 1899.

présentent d'assez grandes analogies avec les actions électriques; rappelons, par exemple, que l'importance de l'effet secondaire électrique ou radiographique dans l'effet total augmente quand les rayons X sont filtrés par un écran et deviennent plus pénétrants (*voir* Chap. II, § 3 et 7; Chap. III, § 2; enfin, ci-après, Chap. IV, § 5).

Il résulte des différences observées entre les trois modes principaux d'action des rayons X ou secondaires (action électrique, radiographique ou radioscopique, Chap. I, § 6, et Chap. III, § 2 et 3) qu'on n'a aucune raison de supposer aucun de ces modes d'action relié simplement à l'énergie des rayons incidents; tout dépend du mode d'utilisation des rayons; en particulier, à mesure que l'épaisseur de la lame d'air d'un condensateur augmente, l'importance relative des rayons les moins pénétrants, qui sont absorbés dans les premières couches d'air, va en diminuant et les différences entre le récepteur électrique et l'écran luminescent sont atténuées; il est clair aussi que l'épaisseur de la couche sensible photographique ou de la couche de sel luminescent employées ne sont pas sans influence. Seul le phénomène de l'échauffement des métaux frappés par les rayons X, découvert et étudié par le professeur Dorn (1), puis par M. Schœps (2), par MM. E. Rutherford et R.-K. Mc. Klung (3), pourrait permettre d'étudier l'énergie des rayons X, du moins celle des rayons absorbés. Il résulte du mécanisme de l'émission secondaire (*voir* Chap. II, § 2, 3 et suiv.) qu'une partie au moins de la transformation de l'énergie des rayons X en chaleur dans la masse d'un métal lourd est précédée de leur transformation en rayons moins pénétrants qui sont étouffés avant d'avoir pu émerger du métal.

(1) E. Dorn, *Wiedemann's Annalen*, t. LXIII, p. 160; 1897.

(2) K. Schœps, *Brande's Zeitschrift fur Naturwiss. Stuttgart*; t. LXXII, p. 145; 1899.

(3) E. Rutherford et R.-K. Mc.-Klung, *Soc. Roy. d. Londres*, novembre 1900.

CHAPITRE IV.

COMPARAISON DES RAYONS DE RÖNTGEN ET DES RAYONS SECONDAIRES AVEC LES RAYONS ULTRA-VIOLETS ET AVEC LES RAYONS CATHODIQUES.

1. Dissymétrie dans la décharge par les rayons de Röntgen et par les rayons secondaires. — 2. Généralisation de la notion de rayons cathodiques. — 3. Analogie de la décharge par les rayons de Röntgen et par les rayons secondaires avec la décharge par les rayons ultra-violets de Lenard. — 4. Analogie des rayons de Röntgen et des rayons secondaires avec les rayons ultra-violets. — 5. Analogie des rayons secondaires et des rayons cathodiques. Électrisation négative des rayons secondaires des métaux lourds.

1. *Dissymétrie dans la décharge par les rayons de Röntgen et par les rayons secondaires.* — La décharge par les rayons ultra-violets ne s'exerce sensiblement que sur les conducteurs électrisés *négativement*, frappés par les rayons; elle est d'essence *dissymétrique*. La décharge par les rayons de Röntgen et par les rayons secondaires a son siège dans le gaz soumis au champ électrique des conducteurs; elle est d'essence *symétrique*, en ce sens que les rayons libèrent dans le gaz d'égales quantités d'électricité positive et d'électricité négative; il importe de rechercher si, dans certains cas, la vitesse de décharge peut être différente suivant que le conducteur étudié est électrisé négativement ou positivement. Je n'ai pu reconnaître nettement une dissymétrie de ce genre permettant de rapprocher la décharge, dans l'atmosphère, par les rayons de Röntgen ou par les rayons secondaires de la décharge par les rayons ultra-violets. J'ai déjà insisté sur les circonstances qui peuvent donner à la décharge d'un condensateur frappé par les rayons de Röntgen l'apparence d'une action localisée à la surface des armatures (*voir* Chap. III, § 4). D'autre part, le fait que le champ élec-

trique tend à se localiser [1] auprès de l'armature négative d'un condensateur plus encore qu'auprès de l'armature positive peut faire paraître l'action de décharge inégalement localisée ou inégalement intense suivant le signe de la charge du conducteur; cette influence est négligeable si la différence de potentiel des armatures du condensateur étudié est suffisante pour qu'on puisse négliger relativement les variations de potentiel dues à la présence des charges électriques libérées dans le gaz par les rayons; j'ai déjà dit que la dissymétrie de l'altération du gradient du champ électrique peut s'expliquer par une vitesse de translation plus grande pour les charges négatives que pour les charges positives.

Voici une autre cause de dissymétrie dans la décharge, qui est particulièrement importante et qui paraît tenir à une inertie dynamique de particules électrisées (*ions*) libérées dans le gaz par les rayons et lancées par la force du champ électrique. J'ai toujours observé que les rayons X ou les rayons secondaires dissipent avec la même vitesse, à $\frac{1}{100}$ près environ, l'électrisation positive ou l'électrisation négative d'un métal placé dans l'air à la pression atmosphérique, si ce métal reçoit les rayons à travers des orifices percés dans une enveloppe métallique C qui est soigneusement reliée au sol et qui ne laisse pas sortir de lignes de forces issues du métal électrisé, *sous la condition expresse qu'aucun champ électrique ne règne à l'extérieur de la cage* C *sur le trajet des rayons.* Mais une notable inégalité entre les vitesses de dissipation des deux électricités apparaît si la cage métallique C est électrisée, ou si un corps électrisé est placé à l'extérieur de la cage C.

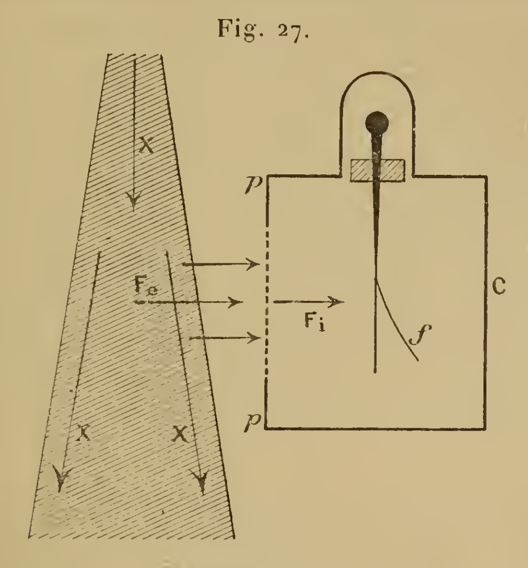
Un faisceau de rayons X (*fig.* 27) passe, dans l'air, près d'une fine toile métallique, ou d'un écran métal-

---

[1] J'ai fait remarquer (*loc. cit.*) que la nature du métal frappé par les rayons de Röntgen influe sur la localisation du champ au voisinage du métal.

lique percé d'orifices, qui ferme électriquement en *pp* le champ intérieur F_i d'un électroscope. Il y a toujours une légère action de décharge α de la feuille d'or *f* en l'absence de tout champ extérieur; elle est due à l'action

Fig. 27.



des rayons secondaires disséminés par l'air atmosphérique. Quand il existe un champ extérieur F_e, on vérifie dans tous les cas la loi suivante :

Si le champ extérieur F_e et le champ intérieur F_i sont de même sens, à l'action de décharge primitive α, mesurée par l'inverse du temps de décharge quand F_e est nul, s'ajoute une action *accélératrice* A souvent très supérieure à α. Si F_e et F_i sont de sens contraires, la présence du champ F_e entraîne une action supplémentaire *a retardatrice* $\Big($qui s'est toujours montrée inférieure à α et généralement comparable à $\frac{\alpha}{2}\Big)$. Voici quelques exemples : 1° Cage électrisée négativement (en communication permanente avec une bouteille de Leyde) et fermée par une fine toile métallique *pp*; feuille d'or *f* négative, chute de *f*, de 90^{mm} à 100^{mm} d'une échelle placée derrière, observée dans un viseur, en 18 secondes; feuille *f* positive, chute de *f* de 90^{mm} à 92^{mm},5 seulement, en 75 secondes.

2° Même dispositif; mais la toile *pp* est remplacée par une plaque de plomb percée de plusieurs orifices circulaires de 1^{cm} de diamètre. Cage au sol et pas de champ extérieur; *f* positive ou négative tombe de 66^{mm} à $98^{mm},5$ en 25 secondes. Cage électrisée négativement; *f* négative tombe de 90^{mm} à 100^{mm} en 13 secondes; *f* positive tombe de $90^{mm},5$ à 93^{mm} seulement en 75 secondes.

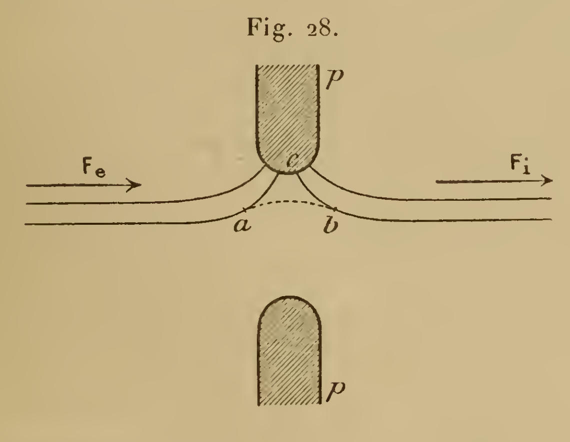
3° Même dispositif qu'en 2°; mais on maintient la cage C au sol et l'on électrise une lame L d'aluminium placée devant la cage dans le faisceau de rayons X. Si L est au sol, comme C, *f* positive ou négative tombe de 90^{mm} à 95^{mm} en 66 secondes. Si L est négative, *f* tombe de la même quantité en 18 secondes seulement si son électrisation est positive et en 175 secondes si son électrisation est négative.

L'*action retardatrice a*, qui s'observe si bien quand l'électroscope est fermé par la plaque percée d'ouvertures (expériences 2° et 3°), ne s'observe plus sensiblement quand il est fermé par la fine toile métallique; l'*action accélératrice* A subsiste alors seule (expérience 1°); elle subsiste sans s'affaiblir beaucoup quand on place la plaque percée d'orifices à 3^{mm} devant ou derrière la toile métallique et en communication électrique avec cette toile; elle disparaît à son tour si, au lieu de la plaque, on place devant la toile métallique une seconde toile fine en communication électrique avec la première; elle disparaît aussi, et les deux électricités fuient sensiblement avec la même vitesse, si l'entrée de l'électroscope est fermée par une feuille métallique même mince, telle qu'une feuille d'aluminium battu de 2 ou 3 microns d'épaisseur, dépourvue de déchirures et de trous visibles à l'œil nu.

2. *Généralisation de la notion de rayons cathodiques.* — Les phénomènes précédents se présentent dès qu'il existe à l'extérieur de la cage C un champ électrique F_e de quelques volts par centimètre, encore bien inférieur au

champ F_i, de l'ordre de 100 volts par centimètre, qui règne dans la cage C. En aucun cas, même quand F_e est très énergique, la feuille d'or électrisée *f* ne se déplace quand on excite le champ extérieur F_e. Il ne me paraît pas possible d'expliquer les phénomènes signalés en admettant qu'une petite partie des lignes de forces du champ F_i viennent, lorsqu'on excite F_e, se raccorder directement avec des lignes de forces du champ F_e. Je pense que les charges électriques libérées par les rayons dans l'air soumis au champ électrique extérieur F_e suivent *à peu près* les lignes de forces de ce champ avec une certaine *vitesse*. Mais quand la ligne de force du champ F_e se recourbe *rapidement* (*fig.* 28) pour aboutir à un bord *c* d'une ou-

Fig. 28.



verture de la paroi *pp* de l'électroscope, on comprend que, si la charge électrique possède une force vive suffisante, elle puisse quitter la ligne de force du champ F_e et bondir suivant un certain chemin *ab* jusqu'à une ligne de force du champ F_i. Si F_i est de même sens que F_e, les charges ainsi projetées dans le champ intérieur y forment un flux électrique qui accroît le flux de décharge normal parce qu'il est de *même sens;* d'où une augmentation de la rapidité de décharge de la feuille d'or. Dans le cas contraire, les flux sont *opposés* et il y a *retard;* mais, dans ce cas, le flux supplémentaire dû à la projection électrique du champ F_e est rapidement ramené vers *p* par le champ F_i,

avant même d'avoir pu prendre une direction voisine de celle du flux normal ; on comprend alors que l'action retardatrice *a* n'apparaisse nettement que si les charges issues de l'extérieur pénètrent assez avant dans l'intérieur de la cage C ([1]). Cela sera réalisé si les ouvertures de la cage C sont assez larges (expériences 2° et 3°), et pas sensiblement si elles sont assez étroites (expérience 1° faite avec une toile métallique dont la maille a environ un cinquième de millimètre de côté). On prévoit aussi et l'expérience confirme que le retard (expériences 2° et 3°) augmente avec le champ extérieur F_e ; les lignes de force entrent alors, en effet, plus avant dans la cage C et s'y recourbent plus complètement ; d'autre part, les charges électriques amenées par le champ extérieur F_e sont sans doute animées d'une plus grande vitesse.

Ainsi les phénomènes que j'ai signalés paraissent dus à un flux de charges électriques qui, animées de certaines vitesses, refusent de recourber très rapidement leur trajectoire suivant les lignes de forces aboutissant aux bords des ouvertures de la cage de l'électroscope ; elles pénètrent ainsi comme un *bombardement* dans l'intérieur de la cage, sans toutefois que leur force vive suffise à leur faire traverser une épaisseur notable d'air à la pression atmosphérique, où ne règne aucun champ électrique (entre deux toiles métalliques identiques, *voir* § 1), ni une épaisseur d'aluminium de l'ordre du micron.

On peut se proposer de dévier ce bombardement par l'*action de l'aimant* et, en opérant dans des *gaz raréfiés*, lui faire atteindre des vitesses de plus en plus grandes,

---

([1]) La flux supplémentaire retardateur ne vient donc pas jusqu'à la feuille électrisée *f* ; mais, avant d'être repoussé jusqu'à la surface des parois *pp*, où il vient se perdre, il *neutralise* en partie les charges de signe contraire du flux primitif dû à l'action primitive de décharge α, qui cheminent en sens inverse et arrivent ainsi affaiblies sur la feuille *f*, d'où l'affaiblissement de la décharge de *f*.

surtout si le champ extérieur est produit par de très grandes différences de potentiel. Sans doute le bombardement traversera-t-il alors une mince feuille d'aluminium et deviendra-t-il progressivement comparable aux *rayons cathodiques*. Déjà l'on peut remarquer que, d'après les expériences dues à M. Child (*voir* Chap. III, § 4), les rayons X qui passent entre les deux armatures d'un condensateur chargé localisent la chute du potentiel au voisinage des armatures et un peu plus auprès de l'armature négative qu'auprès de l'armature positive. Je pense que, la pression des gaz diminuant, la chute de potentiel se localiserait de plus en plus auprès de l'armature négative, grâce à une augmentation de plus en plus grande de la vitesse du flux d'électricité négative par rapport au flux d'électricité positive; le flux négatif formerait alors les rayons cathodiques que nous connaissons, capables de parcourir de grandes distances dans le vide de Crookes, de se diffuser au travers de minces feuilles d'aluminium (Lenard) pour se propager, en dehors du tube où ils ont pris naissance, sur des mètres de longueur dans un gaz très raréfié, sur quelques centimètres seulement dans l'atmosphère qui les absorbe et les diffuse ([1]).

On aurait ainsi toute une série de flux anodiques et cathodiques depuis le bombardement vraisemblablement très lent et très diffusable que j'ai produit et étudié dans l'atmosphère, jusqu'aux rayons cathodiques considérablement plus rapides et mieux définis excités dans le vide de Crookes sous l'influence de différences de potentiel relativement considérables. Depuis que j'ai fait ces observations et ces rapprochements ([2]), le professeur J.-J. Thomson et ses élèves ont établi que les charges électriques ou *ions*

([1]) P. Lenard, *Wied. Annalen d. Physik,* t. LI, p. 223; 1894; t. LII, p. 23; 1894; et t. LVI, p. 255; 1895.

([2]) Pli cacheté déposé à l'Académie des Sciences le 18 juillet 1898, ouvert dans la séance du 5 février 1900.

libérées dans les gaz par les divers agents (rayons X, ultra-violets ou des corps radio-actifs, flammes) ([1]) se propagent dans l'air atmosphérique avec des vitesses de quelques centimètres par seconde sous l'influence de champs électriques de quelques volts par centimètre, tandis que les rayons cathodiques ordinaires paraissent, d'après la comparaison de leur déviation magnétique avec leur déviation électrique, se propager avec des vitesses atteignant jusqu'à $100\,000^{km}$ par seconde. Enfin il n'est pas douteux qu'à l'intérieur d'un tube de Crookes les rayons de Röntgen excités par les rayons cathodiques n'augmentent l'émission cathodique elle-même ; ils doivent libérer dans le gaz raréfié des charges électriques que le champ électrique dirige et divise en deux flux inverses, l'un négatif, relativement rapide, qui s'éloigne de la cathode (rayons cathodiques), l'autre positif, relativement lent et ramené par le champ électrique sur la cathode ([2]).

3. *Analogie de la décharge par les rayons de Röntgen et par les rayons secondaires avec la décharge par les rayons ultra-violets de Lenard.* — Il résulte des expériences décrites dans le présent travail que la décharge d'un conducteur soit positif, soit négatif, est provoquée par les rayons de Röntgen ou les rayons secondaires :

1° Quand le conducteur reçoit directement les rayons ;

2° Quand un corps voisin lui envoie des rayons disséminés (rayons secondaires ou tertiaires) ;

3° Quand le gaz soumis au champ électrique du conducteur est traversé par un faisceau de rayons, même si ce

---

([1]) M. P. Villard a réalisé avec les ions produits par les flammes l'expérience analogue à celle que le dispositif de la *fig.* 27 m'a permis de réaliser avec les ions produits par les rayons de Röntgen (P. Villard, *Société française de Physique*, séance du 16 mars 1900).

([2]) Ce flux positif pourrait constituer, en partie, du moins, l'afflux cathodique de M. P. Villard (cf. P. Villard, *Journal de Physique*, t. VIII, p. 5 et 140 ; 1899).

faisceau ne frappe aucun des conducteurs électrisés, ni directement, ni après dissémination;

4° Quand un faisceau de rayons traverse le gaz soumis à un champ électrique F_e extérieur au champ électrique F_i du conducteur, mais de même sens que F_i et séparé du champ F_i par un écran conducteur discontinu (et même sans doute par un écran continu suffisamment mince, si le gaz étudié est suffisamment raréfié et le champ F_e suffisamment intense).

Ces quatre principaux modes de décharge se groupent d'ailleurs autour du troisième; ils résultent donc tous plus ou moins *indirectement* d'un effet qui a son siège dans la masse du gaz soumis à la fois à l'action du champ électrique et à celle des rayons. Il semble ainsi y avoir opposition complète entre le mode d'action des rayons de Röntgen ou des rayons secondaires et l'action de décharge que les rayons ultra-violets exercent uniquement quand ils *frappent* un corps *négatif*. La différence semble d'autant plus profonde qu'il ne paraît pas y avoir dans le mode de décharge par les rayons de Röntgen, ni par les rayons secondaires, agissant dans l'atmosphère, de dissymétrie partielle annonçant la dissymétrie profonde de la décharge par les rayons lumineux. Mais s'il n'y a pas de rayons de Röntgen ni de rayons secondaires qui se rapprochent, à ce point de vue, des rayons lumineux jusqu'ici étudiés, on peut se demander si, inversement, il n'y a pas d'autres rayons lumineux se rapprochant à ce point de vue des rayons de Röntgen et des rayons secondaires. C'est justement le cas des rayons lumineux ultra-violets récemment découverts et étudiés par le professeur Lenard [1]. En voici le mode de production et les principales propriétés :

[1] P. Lenard, *Ueber Wirkungen des ultravioletten Lichtes auf gasförmige Körper* (*Drude's Annalen d. Physik*, t. I, p. 486-507; 1900). *Ueber die Elektricitätszerstreuung in ultra-violett durchstrahlter Luft* (*loc. cit*, t. III, p. 298-319; 1900).

Les étincelles électriques produites par un gros inducteur, actionné par un interrupteur de Wehnelt et relié à une bouteille de Leyde, éclatent entre deux pointes de métal (Al, Cd, Sn, Pb, Zn ou Mg). Elles sont le siège d'une émission de rayons ultra-violets qui se propagent en ligne droite, se réfractent à travers le spath fluor, le sel gemme, le quartz suivant des indices de réfraction correspondant, d'après les formules de dispersion extrapolées, à des longueurs d'onde allant de $0^{\mu},19$ à $0^{\mu},14$ et sans doute en deçà.

Ces rayons sont capables de provoquer, comme les rayons de Röntgen, les rayons cathodiques, les rayons émis par les corps radio-actifs et les rayons ultra-violets déjà connus, la formation d'un brouillard dans un jet de vapeur d'eau sursaturée. Or, tandis que les rayons ultra-violets antérieurement étudiés ne produisent une décharge qu'en frappant (directement ou après diffusion) un corps négatif et n'ont aucune action tant qu'ils rencontrent seulement un conducteur positif (1) ou un gaz soumis au champ électrique des conducteurs, les rayons ultra-violets de Lenard agissent sensiblement à la manière des rayons de Röntgen et des rayons secondaires : ils peuvent décharger non seulement les conducteurs électrisés négativement, mais encore les conducteurs électrisés positivement, dans certains cas avec la même vitesse, et cela même quand ils ne frappent point de conducteurs négatifs, soit directement, soit après diffusion; *ils agissent surtout en rendant le gaz qu'ils traversent conducteur de l'électricité;* la nature de la surface qu'ils frappent est sensiblement indifférente. Cette action des rayons ultra-

(1) Toutefois, M. Branly avait déjà observé, au cours de ses recherches (*Journal de Physique*, 3e série, t. II, p. 300; 1893) que l'étincelle de décharge d'un condensateur émet une lumière très active sur les corps négatifs et *active aussi*, très faiblement il est vrai, *sur les corps positifs*.

violets de Lenard sur la *masse même du gaz,* sans intervention nécessaire d'un corps solide ou liquide, est nouvelle. Les anciennes expériences de Hertz et de Hallwachs, ainsi que celles qui ont suivi, étudiaient seulement les actions électro-optiques qui ont leur siège sur la *surface* des corps solides ou liquides.

4. *Analogie des rayons de Röntgen et des rayons secondaires avec les rayons ultra-violets.* — Les rayons ultra-violets de Lenard traversent très bien le spath fluor, le gypse, le sel gemme, le quartz, mais non quand ces corps sont pulvérisés; ils sont arrêtés par quelques millimètres de spath d'Islande ou d'aragonite, par quelques centièmes de millimètre de papier, de gélatine, de celluloïd. L'eau transparente en couche mince est opaque sous une épaisseur de $1^{mm},3$. Ces rayons se propagent bien *dans le vide,* mais l'air, l'oxygène, le gaz carbonique et surtout le gaz d'éclairage les arrêtent, *d'autant plus énergiquement d'ailleurs que la longueur d'onde des rayons est plus petite.* Ainsi l'étincelle entre deux pointes d'aluminium émet un *faisceau hétérogène* qui comprend les rayons de longueurs d'onde un peu supérieures ou un peu inférieures à $0^{\mu},19$ déjà étudiés par M. A. Cornu [1], lesquels sont arrêtés par quelques mètres d'air atmosphérique, puis des rayons de longueurs d'onde plus faibles étudiés par le professeur Lenard, lesquels sont arrêtés par quelques décimètres d'air, ou par quelques centimètres seulement pour ceux dont la longueur d'onde descend à $0^{\mu},14$; ces derniers traversent encore très bien l'hydrogène; mais le faisceau émis par une étincelle d'aluminium ou de cadmium placée

---

[1] A. Cornu, *Sur l'absorption par l'atmosphère des radiations ultra-violettes* (*Comptes rendus,* t. LXXXVII, p. 1285; t. LXXXVIII, p. 1101; t. LXXXIX, p. 808; t. XC, p. 943). M. A. Cornu a démontré que le spectre de la lumière solaire filtrée par l'atmosphère terrestre s'arrête à $0^{\mu},293$, par suite de l'absorption des radiations ultra-violettes extrêmes. Encore faut-il observer à une certaine altitude pour prolonger le spectre solaire jusqu'à cette limite.

à 1^{mm} d'une paroi de quartz, et transmis au delà de cette paroi dans un récipient où règne le vide, est affaibli à son tour, quand on fait entrer de l'hydrogène dans le récipient à paroi de quartz; l'hydrogène, dans ces conditions, devient conducteur de l'électricité; cela semble indiquer, à défaut d'expériences de réfraction spéciale, qu'il y a encore dans les faisceaux émis par les étincelles, éclatant entre deux pointes d'aluminium ou de cadmium, des rayons ultra-violets arrêtés par quelques millimètres d'air et absorbés sensiblement par l'hydrogène même. Comme les autres, ces rayons éminemment absorbables par les gaz sont arrêtés par le mica, mais traversent le spath fluor, le gypse, le sel gemme; ils rejoignent sans doute les rayons ultra-violets extrêmes de M. V. Schumann [1] ($\lambda = 0^{\mu},1$), qui sont arrêtés par $\frac{1}{10}$ de millimètre d'air atmosphérique et ne peuvent être étudiés que dans l'hydrogène raréfié.

Les considérations théoriques qui m'ont permis d'expliquer, dans l'hypothèse ondulatoire, la propagation rectiligne des rayons de Röntgen [2] sans réfraction ni réflexion régulière, conduisent encore aux résultats suivants : dès que la longueur d'onde λ n'est pas très considérable par rapport au double de la distance moyenne d des particules, le corps, si pur et si homogène soit-il d'ailleurs, doit diffuser en tous sens une partie de la lumière qu'il reçoit, pendant qu'une autre partie traverse le milieu en ligne droite en se réfractant et se réfléchissant suivant les lois ordinaires.

---

(1) V. SCHUMANN, *Sitzungsber. d. K. Akademie d. Wissensch. zu Wien*, 2e série, t. CII, p. 415-625; 1893. Eders Jarhrb.; 1896.

Tandis que le professeur Lenard a étudié les rayons ultra-violets au moyen de leur action sur un jet de vapeur sursaturée ou de la conductibilité qu'ils communiquent aux gaz, M. V. Schumann avait étudié spectroscopiquement au moyen de *plaques photographiques spéciales* à sel d'argent sensiblement non émulsionné, les radiations émises, à travers une paroi de spath fluor dans l'hydrogène raréfié, par un tube de Plücker renfermant de l'hydrogène pur.

(2) *Journal de Physique*, 3e série, t. IX, p. 188; 1900.

A mesure que le rapport $\frac{2d}{\lambda}$ augmente, l'importance de la diffusion mécanique et de l'absorption qui en résulte croît aussi; l'absorption proprement dite, qui dépend de la résonance des particules pour les vibrations lumineuses, peut compliquer le phénomène et rendre tel ou tel corps plus spécialement opaque; mais un corps assez transparent sous l'état liquide ou solide doit le devenir bien moins quand il passe à l'état de vapeur $\left(\frac{2d}{\lambda}\right.$ devenant dix fois plus grand, par exemple$\left.\right)$, la masse traversée étant supposée la même; par suite, on prévoit que la plupart des gaz diffuseront les rayons ultra-violets extrêmes et, pour une même masse traversée, d'autant plus énergiquement que la pression sera plus faible $\left(\text{c'est-à-dire } \frac{2d}{\lambda} \text{ plus grand}\right)$. Il en résulte que les rayons bleus et surtout les rayons ultra-violets doivent être diffusés par l'atmosphère; la loi de la diffusion est telle que l'intensité de la lumière diffusée est en raison inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde, tant que $\frac{2d}{\lambda}$ est suffisamment petit vis-à-vis de l'unité, loi déjà donnée par Lord Rayleigh; puis d augmentant ou λ diminuant suffisamment, l'intensité de la diffusion croît de plus en plus vite que ne l'indiquerait la loi précédente et arrive à son maximum, la longueur d'onde λ étant supposée fixe, quand la valeur de $2d$ devient comparable à λ. Cela permet de comprendre l'origine du bleu du ciel (1), de prévoir que l'ultra-violet atmosphérique et, d'une manière générale, les parties les plus réfrangibles du bleu atmosphérique proviennent surtout des masses d'air raréfiées de l'atmosphère supérieure ou sont arrêtées par ces couches; cela explique l'absorption rapidement croissante quand λ diminue. La limite $0^{\mu},1$ des longueurs

(1) Cette explication du bleu du ciel est conforme à une ancienne hypothèse de Brewster.

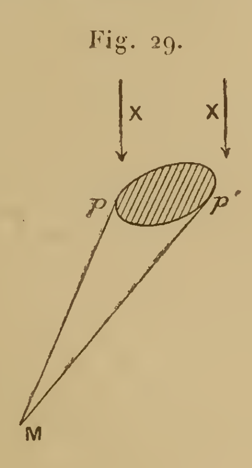
d'onde de l'ultra-violet connu correspond à peu près à $\frac{2d}{\lambda}$ égal à $\frac{1}{10}$ pour les gaz à la pression atmosphérique normale; on approche donc de l'absorption maximum et du cas où, l'influence de l'absorption élective due à la résonance étant laissée de côté, l'indice de réfraction doit commencer à diminuer en même temps que la longueur d'onde, contrairement à la loi de la dispersion normale. Si l'on imagine que l'on monte encore de quelques octaves dans l'ultra-violet, on arrive à des rayons traversant les prismes en ligne droite sans se réfracter. On achève de rendre compte des faits relatifs aux rayons X en supposant que, pour des vibrations encore plus rapides, les particules matérielles absorbent et réfléchissent des quantités d'énergie rayonnante de plus en plus faibles à mesure que la période des vibrations incidentes continue à diminuer. Si, en particulier, on considère les rayons X comme formés de vibrations plus ou moins rapidement amorties ([1]), se succédant irrégulièrement, telles que des vibrations pendulaires amorties du type $Ke^{-\alpha t}\sin 2\pi\frac{t}{\theta}$, il est évident que la *résonance* des particules sera moins énergique que pour des vibrations pendulaires non amorties du type $K\sin 2\pi\frac{t}{\theta}$; de même, pour mettre en branle une cloche, il convient de la soumettre à des impulsions périodiques et non à une succession irrégulière d'impulsions. L'intensité de l'absorption doit alors

([1]) On peut faire rentrer les vibrations pendulaires amorties dans le cas des vibrations pendulaires simples. Une vibration pendulaire amortie du type $v = Ke^{-\alpha t}\sin 2\pi\frac{t}{\theta}$ peut être décomposée d'après l'intégrale de Fourier en un spectre continu formé de vibrations pendulaires simples dont les périodes sont d'autant plus inférieures à θ que le coefficient α d'amortissement est plus faible (*Cf.* en particulier à ce sujet : C.-H. Wind, *Wied. Annalen der Physik*, t. LXVIII, p. 884; 1899). Mais il faut se souvenir que, en dehors de la durée de la vibration v, les vibrations pendulaires simples n'ont pas d'existence physique indépendante; elles se détruisent alors mutuellement.

diminuer après avoir passé par un *maximum* qui n'est peut-être pas bien éloigné de l'absorption complète par $\frac{1}{10}$ de millimètre d'air présentée par les rayons lumineux de longueur d'onde $0^{\mu},1$. Les rayons ultra-violets de Lenard seraient, par rapport à ce maximum, du côté des grandes longueurs d'onde. Les rayons de Röntgen seraient du côté opposé et d'autant plus rapprochés des rayons de Schumann qu'ils sont plus absorbables.

D'après cela, on pourrait, en assimilant les rayons secondaires à des rayons de Röntgen particulièrement absorbables, les placer entre les rayons de Röntgen générateurs et les rayons de Schumann; la transformation des

Fig. 29.



rayons de Röntgen présenterait une certaine analogie avec la *photoluminescence,* et satisferait à la *loi de Stokes,* d'après laquelle la fluorescence et la phosphorescence transforment les radiations surtout en radiations de plus grandes longueurs d'onde. Cette conséquence serait d'accord avec l'hypothèse des vibrations amorties. Soit, en effet, une suite quelconque d'ébranlements amortis formant un faisceau de rayons X. Nous pouvons supposer qu'une particule matérielle pp' (*fig.* 29) diffracte en un point quelconque M les rayons X qu'elle reçoit comme un obstacle matériel diffracterait des rayons sonores formés d'une suite quelconque d'ébranlements aériens amortis. Or si l'ébranle-

ment qui a suivi le chemin pM est éteint en M par suite de son amortissement, le point M reçoit encore pendant un certain temps l'ébranlement diffracté suivant le chemin plus long p'M. L'ébranlement diffracté en M dure ainsi plus longtemps que l'ébranlement incident; il est moins amorti après diffraction qu'avant diffraction et, par suite, plus absorbable et plus diffusable.

Les mouvements pendulaires dans lesquels on peut décomposer l'ébranlement incident sont d'autant plus diffractés que leurs périodes sont plus grandes; la diffraction par réflexion sur les particules agit dans le même sens, les vibrations les plus réfléchies étant justement les plus absorbables, d'après une loi générale de l'optique et de la mécanique des vibrations. La transformation des rayons de Röntgen en rayons secondaires et tertiaires serait ainsi susceptible de fournir toute une série de radiations de plus en plus absorbables par l'air, qui relieraient les rayons de Röntgen aux rayons ultra-violets.

5. *Analogie des rayons secondaires avec les rayons cathodiques. Électrisation négative des rayons secondaires des métaux lourds.* — D'un autre côté, le faible pouvoir de pénétration des rayons secondaires des métaux lourds fait penser aux rayons cathodiques de Lenard, capables de parcourir seulement quelques centimètres à peine dans l'air atmosphérique qui les diffuse énergiquement. Cette analogie conduit à rechercher si les rayons secondaires, très absorbables par l'air, transportent avec eux des charges électriques négatives, puisque tel est le caractère fondamental des rayons cathodiques; la déviation des rayons par le champ magnétique (1) ou par le champ électrique sera une conséquence probable de leur électrisation. Il n'y a pas de contradiction entre cette hypothèse et celles qui viennent d'être développées, puisque le

(1) Le professeur E. Dorn a annoncé que les rayons secondaires des métaux lourds sont déviés par le champ magnétique, et dans le même

faisceau émis spontanément par le *radium* de M. et de Mme Curie est un mélange de rayons électrisés négativement [1] analogues aux rayons cathodiques, déviables par le champ magnétique et par le champ électrique, avec des rayons non déviables analogues aux rayons X qui sont, on le sait, sensiblement dépourvus de charges électriques [2].

M. P. Curie et moi avons pu reconnaître l'électrisation négative des rayons secondaires des métaux lourds [3]. A la pression atmosphérique, les rayons X et les rayons secondaires communiquent à l'air une conductibilité telle que le métal rayonnant n'est plus isolé; il est alors impossible de recueillir l'électricité des rayons secondaires. Il fallait éviter en même temps que les rayons secondaires des métaux lourds, souvent très peu pénétrants, ne fussent absorbés au voisinage immédiat du métal qui les émet. Nous avons été ainsi amenés à placer les métaux dans l'air raréfié et à opérer à des pressions de plus en plus faibles, jusqu'au vide de Crookes ($0^{mm},001$ de mercure), afin de rendre à l'air ses propriétés isolantes, malgré l'action des rayons de Röntgen et des rayons secondaires qui le traversent. Nous avons réduit à 3^{mm} ou 4^{mm} seulement la couche d'air raréfié comprise entre le métal rayonnant et les parois métalliques voisines. Dans cette mince couche d'air très raréfié, la force électromotrice entre le métal rayonnant et les parois qui l'entourent produit seulement, sous l'influence des rayons,

---

sens que les rayons cathodiques (*Abhand. d. Naturf. Gesell. zu Halle*, Bd XXII, p. 40-42; 1900).

J'avais antérieurement émis l'opinion que *les rayons secondaires très absorbables des metaux lourds peuvent renfermer des rayons analogues à ceux de Lenard et déviables comme eux par l'aimant* [G. Sagnac, *Recherches sur les transformations des rayons de Röntgen*, Chap. I, 3e paragraphe : *Rayons secondaires, rayons X et rayons de Lenard* (*l'Éclairage électrique* du 12 mars 1898)].

(1) P. Curie et Mme P. Curie, *Sur la charge électrique des rayons déviables du radium* (*Comptes rendus*, t. CXXX, p. 647; 1900).

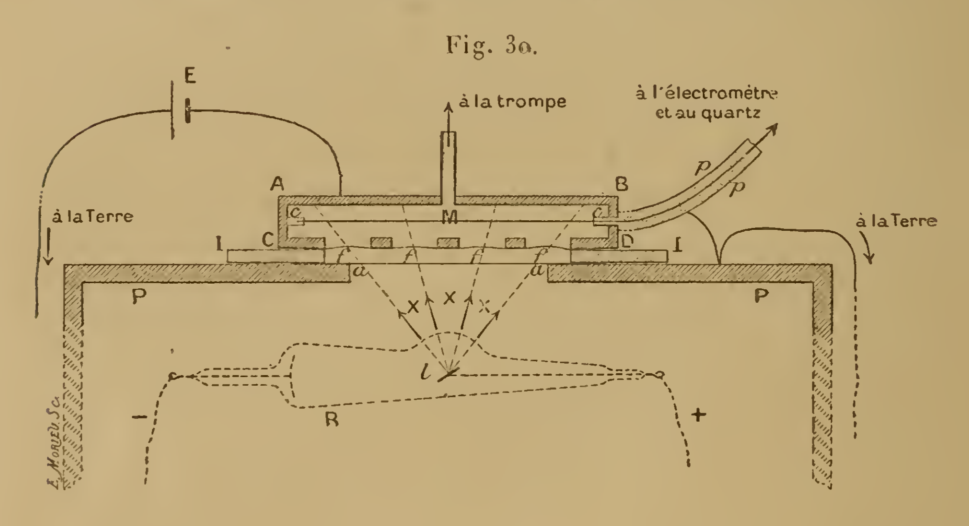
(2) *Voir* la première Partie de ce Travail, Chap. I, § 8.

(3) P. Curie et G. Sagnac, *Comptes rendus*, t. CXXX, p. 1013; 1900.

un courant inférieur, par exemple, à $\frac{1}{100}$ du courant dû à l'électricité négative des rayons secondaires d'un métal tel que le platine, le plomb. Le dispositif est celui-ci :

Une feuille métallique mince M (*fig.* 30) reliée à un électromètre à quadrants et à un quartz piézo-électrique de M. P. Curie, est maintenue isolée au milieu et à 3^{mm} seulement des parois d'une boîte métallique plate ABCD, qu'on peut mettre en relation avec la terre. La face inférieure CD de cette boîte est formée, comme la face supérieure AB, d'une plaque épaisse d'un autre métal N, mais

Fig. 30.



percée de fenêtres *f* que recouvre une mince feuille du métal N. A 6^{cm} au-dessous de la face AB se trouve la lame focus *l*, source des rayons de Röntgen. Le système producteur de ces rayons (tube focus R, bobine Ruhmkorff et interrupteur électrolytique de Wehnelt) est enfermé dans une grande caisse de plomb épais dont la paroi PP est mise à la terre. Les rayons de Röntgen sortent de la caisse PP par une ouverture circulaire de 10^{cm} de diamètre recouverte seulement d'une mince feuille d'aluminium *aa*. On peut faire le vide de Crookes dans la boîte étanche ABCD, reliée à la trompe à mercure.

Quand on opère à la pression atmosphérique, la conductibilité de l'air sous l'influence des rayons est considé-

rable. Lorsque le métal M de la feuille intérieure est différent du métal N des fenêtres *f* et des faces internes de la boîte ABCD, le système (M | N) fonctionne comme une pile dont la force électromotrice fait dévier l'électromètre. On peut, par la méthode d'opposition du quartz piézo-électrique de M. J. Curie, mesurer le courant électrique nécessaire pour maintenir l'électromètre au potentiel zéro; ou bien on peut, sans agir sur le quartz, ramener l'électromètre à demeurer au zéro en intercalant en E, entre la boîte ABCD et la terre, une force électromotrice convenable e_0 prise en dérivation sur le circuit d'un daniell.

Dans ces conditions, si l'on fait le vide dans l'appareil, l'équilibre de l'électromètre se maintient d'abord avec la même force électromotrice e_0 de compensation, tant que la pression ne s'est pas abaissée jusqu'à l'ordre de grandeur du millimètre (seulement, le courant qui prend naissance en l'absence de e_0 devient de plus en plus faible). Pour des pressions inférieures, la force électromotrice de compensation est modifiée. Elle dépasse bientôt celle d'un daniell, augmente constamment et semble croître au delà de toute limite à mesure qu'on se rapproche du vide de Crookes. Si l'on rétablit en E la force électromotrice primitive e_0 qui compensait le phénomène à la pression atmosphérique, on peut, à l'aide du quartz, mesurer le courant nécessaire pour maintenir l'électromètre au zéro. Ce courant, qui apparaît aux pressions de l'ordre du millimètre, augmente d'abord légèrement avec la raréfaction de l'atmosphère, puis devient sensiblement constant pour le vide de Crookes.

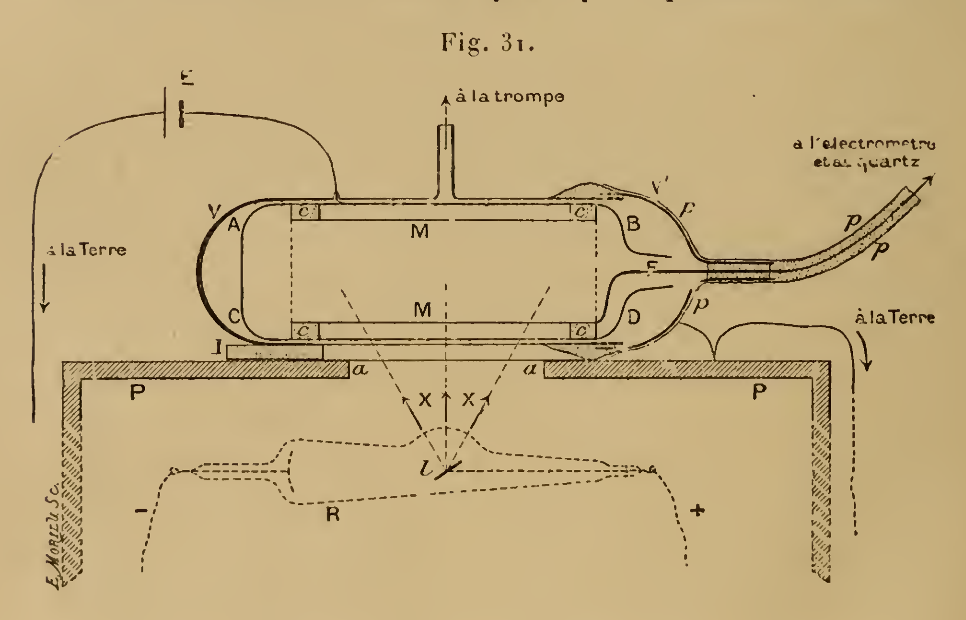
Si, par exemple, le métal intérieur M est du *platine*, et si le métal N des parois internes de la boîte ABCD est de l'*aluminium*, il faut maintenir l'aluminium à un potentiel négatif (inférieur en valeur absolue à 1 daniell) pour obtenir la compensation à la pression atmosphérique.

Dans le vide de Crookes, cette force électromotrice n'est

plus suffisante, et il faudrait porter l'aluminium à un potentiel négatif de valeur absolue égale à 30 volts environ si l'on voulait obtenir la compensation. Si l'on maintient la force électromotrice e_0 qui compensait le phénomène à la pression atmosphérique, on constate que, dans le vide de Crookes, sous l'action des rayons de Röntgen, le platine se charge positivement. Le courant de charge, mesuré à l'aide du quartz, est de l'ordre de grandeur de 10^{-10} ampère quand on utilise, à travers les fenêtres f recouvertes d'aluminium mince, une surface d'environ 30^{cmq} placée à 6^{cm} de la source l des rayons de Röntgen.

Ce courant est assez faible pour qu'on puisse dire : Tant

Fig. 31.



qu'on n'opère pas dans un gaz raréfié, les rayons secondaires provoquent la conductibilité des gaz en y libérant d'*égales* quantités d'électricité positive et négative. Mais dans un gaz raréfié l'on voit que l'influence des charges négatives des rayons secondaires apparaît; alors les rayons X déchargent les corps négatifs plus rapidement que les corps positifs, ou même ils augmentent la charge des corps positifs. Il est remarquable que cette dissymétrie de la décharge produite *dans le vide* par les rayons de Röntgen

qui frappent un métal lourd, est de même sens que la dissymétrie de la décharge des conducteurs frappés par les rayons ultra-violets de Hertz et de Hallwachs.

Des résultats peu différents sont obtenus à l'aide de la disposition représentée par la *fig.* 31 : la feuille métallique mince M est alors enroulée en cylindre, et la boîte plate est remplacée par un second cylindre métallique ABCD de même axe que MM. On introduit le système MMABCD dans le récipient V de verre relié à la trompe à mercure, puis on ferme le récipient V avec le couvercle de verre V' mastiqué au golaz. Avec ce second dispositif, on évite les rentrées d'air plus facilement qu'avec le premier.

Ces faits pourraient, à la rigueur, s'expliquer par une variation continue de la force électromotrice de contact, qui croîtrait dans d'énormes proportions avec le degré de vide. Cette manière de voir est peu vraisemblable [1]. On explique, au contraire, nettement les phénomènes en admettant que les rayons secondaires émis par les métaux en expérience emportent avec eux de l'électricité négative et libèrent, dans le métal, la quantité complémentaire d'électricité positive. Le platine transformant les rayons de Röntgen considérablement plus que l'aluminium, son émission d'électricité négative est de beaucoup plus considérable que l'émission opposée de l'aluminium, et le platine se charge positivement.

On peut renverser le phénomène en mettant l'aluminium en M à l'intérieur et le platine mince ($\frac{1}{100}$ de millimètre) autour de M en ABCD*f* (*fig.* 30) ou ABCD

---

(1) On a démontré que, si l'on fait le vide de Crookes dans un récipient renfermant un condensateur dont les armatures sont formées de deux métaux M et N, la force électromotrice du couple MN n'en est pas altérée; elle est même indépendante de la nature du gaz ambiant, raréfié ou non, tant que l'on ne chauffe pas les métaux M et N dans le vide de manière à en faire dégager les gaz inclus et à les remplacer par un autre gaz. (Bottomley, *B.-A. Report*, 1885; Spiers, *Phil. Mag.* t. XLIX, particulièrement p. 70, janvier 1900.)

(*fig.* 31). On constate alors que l'aluminium intérieur M, soumis à l'émission secondaire du platine, recueille de l'électricité négative.

Nous avons fait varier la nature des métaux et constaté en particulier que le plomb et le platine sont parmi les métaux qui émettent le plus de charges négatives sous l'action des rayons X. Viennent ensuite l'étain et le zinc. Quant à l'aluminium, des expériences faites avec une enceinte de Faraday tapissée extérieurement d'aluminium et recevant des rayons de Röntgen semblent montrer que les rayons secondaires assez pénétrants de ce corps sont, comme les rayons de Röntgen générateurs, dont ils diffèrent peu, sensiblement dépourvus de charge électrique.

L'intensité des charges électriques négatives des rayons secondaires du métal M, étudiées avec la disposition de la *fig.* 31, ne s'affaiblit pas considérablement lorsqu'on compare un appareil dont l'enveloppe de verre V est relativement mince ($\frac{1}{2}$ millimètre) à un autre où elle est plus épaisse (3^{mm}). Avec le dispositif de la *fig.* 30, les rayons X pénétrant dans la boîte ABCD par les fenêtres à travers une feuille d'aluminium d'épaisseur de $\frac{1}{10}$ de millimètre, l'interposition d'une glace de verre de 5^{mm} sur le trajet des rayons de Röntgen affaiblit le phénomène, mais en le laissant comparable à ce qu'il était d'abord; l'interposition d'une lame d'aluminium d'un demi-millimètre sur le trajet des rayons de Röntgen réduit à peine (moins de $\frac{1}{100}$) l'électrisation négative des rayons secondaires du platine. Les charges négatives des rayons secondaires proviennent donc surtout de l'action exercée sur le métal M par les rayons X les plus pénétrants du faisceau incident. Ce fait est analogue à celui qui a été signalé à propos de l'activité électrique des rayons secondaires (*voir* Chap. II, § 3 et 7, et Chap. III, § 2 et 4), mais il est ici encore bien plus marqué.

Le rapprochement précédent est en accord avec celui

que l'on peut faire au sujet du pouvoir de pénétration des charges négatives lancées par le métal M. Quand, au lieu d'opérer dans le vide, nous avons opéré, M. P. Curie et moi, en plongeant le condensateur MN dans un diélectrique tel que la paraffine, l'ébonite, le phénomène de l'émission d'électricité négative de M en N disparaissait sensiblement. Dans le cas seulement où M et N n'étaient séparés que par une fraction de millimètre de paraffine, l'électromètre accusait encore une faible charge correspondant à des courants de l'ordre de 10^{-12} ampère; les variations de ces faibles courants avec la nature des métaux M et N s'accordaient à faire penser qu'ils étaient dus à l'émission par les métaux lourds de charges négatives rapidement absorbées par la paraffine au voisinage du métal.

Une expérience directe m'a d'ailleurs montré le faible pouvoir de transmission [1] de l'émission électrique du plomb, par exemple : une moitié longitudinale du cylindre de plomb épais MM (*fig.* 31) est recouverte d'une feuille d'aluminium battu dont l'épaisseur calculée d'après la surface, le poids et la densité 2,7 est de 0,46 micron. Les rayons X frappant le côté nu du cylindre, j'observe, à la pression $0^{mm},001$ de mercure, un courant de l'ordre de 10^{-10} ampère dû au bombardement d'électricité négative issue du plomb nu MM; c'est-à-dire que le plomb MM se charge de la quantité complémentaire d'électricité positive et il faut, pour le maintenir au potentiel zéro pendant $32^{s},2$, disposer sur le plateau du quartz piézo-électrique une masse de 500^{gr} en l'abandonnant progressivement à l'action de son poids. L'appareil VV', une fois retourné de 180 degrés autour de son axe, de manière que les rayons X frappent maintenant la face de plomb recouverte d'aluminium battu, l'émission d'électricité négative par le plomb à travers

[1] La transmission étudiée ici peut avoir lieu en partie ou en totalité par diffusion postérieure; la même remarque s'applique d'ailleurs à la transmission de l'action électrique de décharge ou de l'action radiographique des rayons secondaires des métaux lourds telle qu'elle est étudiée Chap. II, § 5 et 6.

cette feuille d'aluminium correspond à un poids de 500gr pour 53g,5 c'est-à-dire n'est plus que les $\frac{3}{5}$ de celle du plomb nu. Ce coefficient de transmission des charges électriques est assez peu différent de celui que présenteraient les rayons cathodiques extérieurs à un tube à vide dans les expériences de Lenard. Il est aussi comparable à celui de l'action électrique de décharge des rayons secondaires, déjà étudié (Chap. II, § 5 et 6) et à celui de l'action radiographique (*loc. cit.*).

Il importe de remarquer que les mesures des courants d'électricité négative issue des métaux lourds frappés par les rayons X ont, pour des conditions expérimentales données, un sens absolu; la quantité d'électricité transportée par les rayons secondaires est, dans un vide suffisamment poussé, indépendante de la distance parcourue par les rayons secondaires; nous avons vu, au contraire, que les intensités des actions électriques radiographiques ou radioscopiques des rayons secondaires, et aussi des rayons X, dépendent du mode d'utilisation des rayons et, en particulier, de l'épaisseur d'air du condensateur électrique et de la couche photographique ou luminescente qui les reçoit (*voir* Chap. III, fin du § 4). Il ne paraît d'ailleurs y avoir aucun lien simple entre l'énergie des rayons secondaires telle qu'on pourrait la mesurer au moyen d'un bolomètre fondé sur l'échauffement d'un métal par ces rayons et la quantité d'électricité négative qu'ils transportent. L'ensemble des faits observés conduit à penser que l'*émission électrique secondaire* des métaux lourds possède des propriétés analogues à celles des rayons cathodiques et des rayons déviables du radium : les particules d'électricité négative des rayons sont capables de dissocier l'électricité neutre des particules des gaz en quantités d'électricités positive et négative considérablement supérieures à la quantité d'électricité négative des rayons, tant du moins que le gaz étudié n'est pas trop raréfié. Il ne faut pas confondre la production de ces rayons catho-

diques, qui, dans le vide et même en l'absence de tout champ électrique, émanent du métal M frappé par les rayons X, avec la production déjà signalée (§ 1 et 2) d'un flux d'électricité soit positive, soit négative, dans un gaz soumis au champ électrique.

Nous avons vu que l'action des rayons X et des rayons secondaires sur les gaz n'est pas essentiellement différente de l'action des rayons ultra-violets étudiés par Lenard. D'autre part, l'émission de rayons cathodiques par un métal lourd que frappent les rayons X n'est pas plus étrange que le phénomène analogue produit par les rayons ultra-violets : le professeur Righi ([1]) et, plus récemment, le professeur P. Lenard ([2]) ont en effet trouvé qu'un métal frappé par les rayons ultra-violets émet un flux d'électricité négative, même lorsque la surface métallique frappée par les rayons n'est pas électrisée. Cette émission a les caractères de rayons cathodiques particulièrement absorbables et l'étude n'a pu en être faite par le professeur Lenard que dans le vide de Crookes.

L'électrisation négative des rayons secondaires fournit donc une analogie nouvelle entre les rayons X et les rayons ultra-violets. Il devient alors de plus en plus probable qu'il y a, dans les rayons secondaires, des rayons non électrisés de l'espèce même des rayons X incidents qui les produisent en se diffusant ou se transformant ([3]).

([1]) A. Righi, *Atti d. R. Acc. d. Lincei*, p. 81; 1890.

([2]) P. Lenard, *Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht* (*Drude's Annalen d. Physik*, t. II, p. 359-370; 1900). Cette émission d'électricité négative permet au professeur Lenard d'expliquer la déperdition d'électricité négative sous l'action des rayons ultra-violets.

([3]) Mes recherches me portent à penser qu'il existe de tels *rayons neutres* (non électrisés et non déviables). C'est aussi ce que le professeur Dorn indique dans la Note déjà citée (*Abhand. d. Naturf. Gesell. zu Halle*, t. XXII, p. 10-42; 1900). Il dit (p. 40) que les rayons secondaires de l'aluminium ne sont pas déviés par le champ magnétique, et (p. 41) que le plomb, le platine, l'étain, le cuivre émettent à la fois des rayons déviables et des rayons non déviables.

CONCLUSIONS.

I. Eu égard à la propagation rectiligne des rayons X sans réfraction ni diffraction, les silhouettes qu'ils projettent ne présentent pas de singularités qui ne soient présentées aussi par les silhouettes que projette la lumière. Les apparences de franges de diffraction que l'on obtient parfois disparaissent, comme plusieurs autres illusions, quand on restreint suffisamment le diamètre apparent de la source des rayons X. L'épanouissement d'un pinceau de rayons au delà d'une fente étroite, qui est, dans tous les cas, un critérium très sûr de la diffraction, ne s'est pas présenté pour les rayons X, si fines qu'aient été les fentes employées et si éloignée qu'ait été la plaque sensible enregistrant la trace du pinceau de rayons. Les rayons X transmis par quelques mètres d'air ne peuvent, d'après la perfection de leur propagation rectiligne, renfermer de vibrations dont la longueur d'onde atteigne le millième de micron. Il en résulte qu'on peut expliquer les singularités de l'optique des rayons X en tenant compte de la discontinuité de la matière et imaginant que ces rayons sont formés d'ébranlements soit transversaux, soit longitudinaux de l'éther ayant des longueurs d'onde notablement inférieures à la distance des particules matérielles dans les corps solides ou liquides. Cette hypothèse ondulatoire rend suffisamment compte des phénomènes qui accompagnent la propagation des rayons X à travers la matière.

II. Pendant qu'un faisceau de rayons X se propage en ligne droite à travers un corps jusqu'à une profondeur variable à la fois avec la nature du corps et celle des rayons, chaque élément de matière situé sur le trajet du faisceau émet en tous sens des rayons analogues dits *secondaires* jouissant des propriétés principales des rayons X : propagation rectiligne, dissémination nouvelle et production de rayons deux fois disséminés dits *tertiaires,* action sur

les couches sensibles photographiques, illumination des platinocyanures, décharge des conducteurs électrisés.

Tous les corps émettent des rayons secondaires dont les pouvoirs de pénétration varient avec la nature des rayons X incidents et avec celle des éléments chimiques qui entrent dans la composition du corps étudié, sans que l'état physique paraisse influer sensiblement. Dans le cas au moins de métaux lourds, tels que le *cuivre,* le *zinc,* le *fer* ou le *nickel,* l'*étain,* le *platine* ou le *plomb,* et des corps qui en renferment, les rayons secondaires émis sont moins pénétrants que les rayons X générateurs et ne peuvent sortir du corps que si l'élément de matière d'où ils émanent est assez voisin d'une surface libre, en particulier de la surface d'entrée des rayons X, ou de la surface de sortie. Le phénomène de l'émission secondaire ne peut alors être comparé à une diffusion élective; c'est une véritable transformation des rayons X en rayons moins pénétrants. L'émission tertiaire provoquée par des rayons secondaires peut fournir de même des rayons tertiaires encore moins pénétrants que les rayons générateurs.

Les faisceaux de rayons X jusqu'ici employés se comportent comme un mélange de rayons simples de pouvoirs de pénétration assez divers. Un faisceau de rayons secondaires excité par un faisceau de rayons X, qui frappe un coups même simple, est éminemment complexe. Si le corps renferme un élément tel que l'un des métaux lourds déjà cités, le faisceau secondaire émis renferme des rayons secondaires très transformés plus absorbables que les divers rayons simples du faisceau incident.

L'ordre dans lequel ces métaux ont été nommés jouit, d'après les diverses expériences, des propriétés suivantes : chaque métal émet des rayons secondaires plus transformés, plus absorbables et plus actifs que ceux des métaux qui le précédent, supposés frappés par le même faisceau de rayons X; c'est l'ordre des pouvoirs de transformation

croissants et des activités secondaires croissantes. Pour chaque faisceau secondaire, les rayons les plus actifs sont les plus absorbables. Pour le fer, le nickel et les métaux suivants, les rayons doués de la plus grande activité électrique ou radiographique sont arrêtés par des couches d'air dont l'épaisseur descend au centimètre, au millimètre et même au-dessous suivant les rayons simples considérés et suivant la nature du métal; les rayons X qui excitent ces rayons secondaires si peu pénétrants traversent, au contraire, sans affaiblissement sensible les mêmes épaisseurs d'air et aussi des épaisseurs beaucoup plus grandes.

Le pouvoir de transformation d'un métal vis-à-vis des rayons X paraît distinguer ce métal d'un autre métal, sauf quand les poids atomiques sont assez voisins (Pb et Pt) ou que les métaux sont des éléments chimiques analogues (Fe et Ni). L'étude de l'action électrique d'un corps frappé par les rayons X permet d'y reconnaître la présence d'une petite quantité d'un élément très actif par rapport au corps dans lequel il est disséminé, par exemple le cuivre, le fer, dans l'aluminium.

L'émission secondaire intervient dans l'étude de la transparence des corps pour les rayons X : en général, la distance du récepteur électrique ou photographique à une lame donnée influe sur la transparence apparente de cette lame pour les rayons X; dans le cas de deux ou plusieurs lames superposées de matières différentes, l'ordre de superposition influe aussi. On élimine ces anomalies et l'on observe vraiment la transparence de la lame ou du système de lames en plaçant l'électroscope ou la plaque photographique assez loin des lames étudiées pour recevoir seulement les rayons X, qui les traversent en ligne droite, et pas sensiblement les rayons secondaires, qui émanent en tous sens de la face de sortie des rayons X. Cette influence des rayons secondaires est bien moins importante quand le récepteur est un écran luminescent.

Les rayons secondaires rendent les gaz qu'ils traversent conducteurs de l'électricité à la manière des rayons X. Quand un conducteur est frappé par les rayons X, l'action des rayons secondaires sur le gaz adjacent au conducteur augmente la conductibilité produite dans ce gaz par les rayons X. Cet effet secondaire électrique suffit à interpréter les diverses particularités de l'influence propre au métal dans le phénomène. La réunion d'un certain nombre de circonstances permet de comprendre comment l'action propre du métal a pu paraître localisée à la surface du métal, aux divers physiciens qui l'ont étudiée sans apercevoir l'influence des rayons émis par le métal. La grande importance de l'action propre d'un métal lourd dans le phénomène de la décharge s'explique par la grande activité des rayons secondaires du métal, qui sont bien plus absorbables par l'air que les rayons X incidents et, à égalité d'énergie, y développent une conductibilité considérablement plus grande. L'action photographique des rayons secondaires présente d'assez grandes analogies avec l'action électrique des mêmes rayons; elle favorise aussi beaucoup l'action des rayons secondaires les moins pénétrants. Cette particularité est bien moins marquée pour l'action de luminescence. Tout indique que, si l'on mesurait bolométriquement l'énergie des rayons secondaires, comme MM. Dorn, Schoeps, E. Rutherford et R.-K. Mc.-Klung ont mesuré celle des rayons X, elle serait considérablement plus faible que celle des rayons X générateurs et passerait inaperçue quand les rayons secondaires seraient mélangés avec les rayons X qui les excitent. En particulier, il faut se souvenir que la transformation des rayons X en augmente l'activité au point de permettre de déceler la présence de rayons X très pénétrants dont l'activité pourrait passer inaperçue.

Tandis que les rayons ultra-violets étudiés jusqu'en 1900 ne dissipent sensiblement l'électricité que lorsqu'ils frap-

pent un conducteur électrisé négativement et n'ont pas d'action sur les gaz, les rayons secondaires, comme les rayons X, ont une action directe sur les gaz. Quelques singularités de l'action des rayons X ou des rayons secondaires s'interprètent bien en faisant intervenir les vitesses et les forces vives que les charges électriques, libérées dans le gaz par les rayons, prennent sous l'influence du champ électrique; il peut se produire, dans certains cas, des phénomènes analogues aux phénomènes cathodiques, qu'ils permettent de généraliser beaucoup. L'opposition entre l'action des rayons X ou des rayons secondaires et celle des rayons ultra-violets dans les phénomènes de décharge n'est d'ailleurs qu'apparente : le professeur P. Lenard a, en effet, montré récemment que les rayons ultra-violets extrêmes, au-dessous de la longueur d'onde $0^{\mu},2$, absorbables par quelques centimètres ou quelques millimètres d'air, suivant leur longueur d'onde, rendent les gaz conducteurs de l'électricité à la manière des rayons X, et, dans certains cas, déchargent sensiblement avec la même vitesse les corps positifs ou négatifs.

L'ensemble des faits conduit à considérer les rayons secondaires issus de la transformation des rayons X comme des rayons X très peu pénétrants, peut-être intermédiaires entre les rayons X des tubes *mous* de Röntgen et les rayons ultra-violets extrêmes. Toutefois il est certain qu'une partie des rayons secondaires des métaux lourds échappe à cette dernière analogie; tandis, en effet, que ni les rayons ultra-violets, ni les rayons X ne sont électrisés, les rayons secondaires des métaux lourds renferment, dans leur partie la plus absorbable, un rayonnement d'électricité négative analogue aux rayons cathodiques et aux rayons déviables du radium, aussi peu pénétrant que les premiers et, pour cette raison, difficile à étudier ailleurs que dans le vide de Crookes; ces rayons secondaires électrisés correspondent, dans l'histoire

des rayons X, aux rayons cathodiques encore plus absorbables que la lumière ultra-violette excite en frappant les métaux, et que le professeur P. Lenard a récemment étudiés dans le vide de Crookes; l'existence des rayons secondaires électrisés fournit ainsi une nouvelle analogie entre les rayons X et les rayons ultra-violets.

En résumé, la perfection de la propagation rectiligne des rayons X sans diffraction, ni réfraction sensibles, le caractère surtout atomique de l'absorption qu'ils éprouvent et de l'émission secondaire en tous sens qu'ils provoquent en rencontrant la matière, sont les traits essentiels de leur optique. L'ensemble des faits est particulièrement favorable à l'hypothèse d'après laquelle les rayons X seraient formés d'ébranlements ultra-rapides de l'éther et seraient peut-être des rayons ultra-ultraviolets. Quel que soit d'ailleurs l'avenir réservé à cette hypothèse, le fait que divers éléments chimiques transforment les rayons X en une série de rayons secondaires, très différents des rayons générateurs par leur pouvoir de pénétration beaucoup plus faible et par leur électrisation négative, fournit la plus caractéristique des relations entre les rayons X et la matière. L'étude des rayons secondaires dérivés des rayons X permet ainsi de préciser la nature des rayons X.

Vu et approuvé :

Paris, le 17 novembre 1900.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 17 novembre 1900.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

GRÉARD.

TABLE DES MATIÈRES.

SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

La synthèse des sucres.

Vu et approuvé :

Paris, le 17 novembre 1900.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

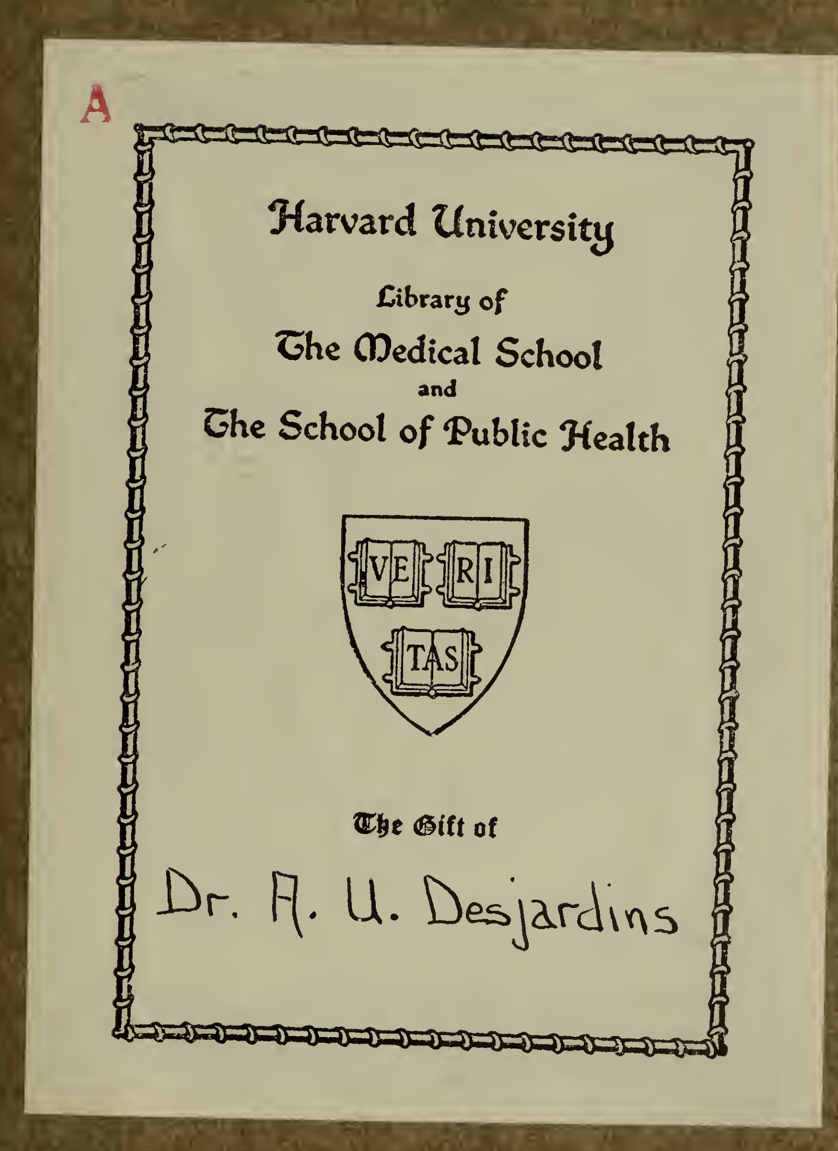
Paris, le 17 novembre 1900.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

GRÉARD.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
29449 Quai des Grands-Augustins, 55.




A
Harvard University
Library of
The Medical School
and
The School of Public Health
VE RI TAS
The Gift of
Dr. A. U. Desjardins